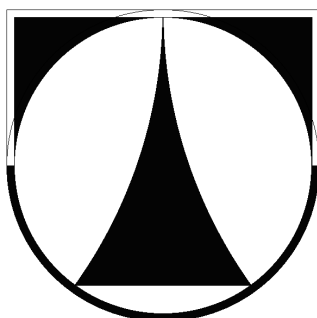


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



DISERTAČNÍ PRÁCE

**Aplikace CO₂ interního chlazení ve
vyfukovacím procesu**

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Obor 2303V002 Strojírenská technologie

zaměření
Zpracování plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

**Aplikace CO₂ interního chlazení
ve vyfukovacím procesu**

**The Application of CO₂ Internal Cooling
in Blow Molding Process**

Autor: Ing. Pavel Brdlík

Vedoucí katedry: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.

Školitel: Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 172

Počet obrázků: 165

Počet tabulek: 37

Počet příloh: 10

Anotace

Téma práce: **Aplikace CO₂ interního chlazení ve vyfukovacím procesu**

Disertační práce se zabývá posouzením aplikovatelnosti nekonvenčního způsobu interního chlazení injektáží zkapalněného oxidu uhličitého v extruzně vyfukovacím procesu. Ve vyfukovacím procesu je zjišťován optimální způsob nastavení technologických parametrů procesu chlazení, stanoveny chladicí charakteristiky použitého média, stanovena efektivita chlazení u tvarově i objemově rozdílných produktů a proveden ekonomický rozbor problematiky. Další oblastí experimentální činnosti je detekce vlivu progresivního interního chlazení na kvalitu vyfukovaných produktů. Kromě ověření aplikovatelnosti současných CO₂ temperačních systémů je součástí předkládané disertační práce rovněž návrh a realizace inovovaného způsobu interního chlazení zkapalněnými plyny. Výsledkem je vznik komplexního zařízení, které umožňuje dosažení žádaného zvýšení efektivity chlazení výrobního nástroje, a tím zvýšení výrobního taktu při současném snížení výrobních nákladů.

Klíčová slova: vyfukovací proces, interní chlazení, oxid uhličitý, temperační systém

Annotation

Subject of thesis: **The Application of CO₂ Internal Cooling in Blow Molding Process**

The dissertation thesis deals with the evaluation of applicability unconventional way of internal cooling injection of the liquefied carbon dioxide in the extrusion blow molding process. In the blow molding process the optimal adjustment of cooling technological parameters was tested, cooling characteristics of the used medium were defined, cooling efficiency for products with different shapes and volumes was evaluated and there was also made economical analysis. The detection influence of progressively internal cooling on the quality of blow molding products represents another scope of the dissertation thesis experimental part. Except utility of the common CO₂ tempered system is part of dissertation thesis focuses also on design and realization the innovative way of internal cooling liquefied gases injection. As a result there is creation of complex equipments which made possible to achieve desired increasing cooling efficiency of production instrument and thus consequently to increase production time together with degreasing of production costs.

Keywords: Blow Molding Process, Internal Cooling, Carbon Dioxide, Tempered System

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména, § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/200 Coll. Applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation of grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation on the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultations.

Datum / Date: 04.03.2015

Podpis / Signature:

Poděkování

V první řadě bych tímto chtěl poděkovat vedoucímu disertační práce prof. Dr. Ing. Petr Lenfeldovi za cenné rady a drahocenný čas strávený konzultacemi řešené problematiky. Dále Ing. Petru Kůsovi Ph.D. a všem zainteresovaným pracovníkům firmy GDK spol. s.r.o. za umožnění realizace výzkumné části práce a spolupráci ve vývoji inovativního řešení CO₂ interno chlazení integrovaného do extruzně vyfukovacího procesu. Rovněž velice děkuji členům KSP za odborné rady při realizaci a vyhodnocení experimentálního měření.

V neposlední řadě nesmím opomenout poděkovat všem ostatním, kteří mě podporovali po celou dobu tvorby disertační práce, zejména pak mé manželce Veronice Brdlíkové, která projevila neskonalé pochopení nad plněním tohoto časově náročného úkolu.

OBSAH

1 ÚVOD.....	13
2 TECHNOLOGIE VYFUKOVÁNÍ.....	15
3 TEMPERAČNÍ SYSTÉMY POUŽÍVANÉ U VYFUKOVACÍHO PROCESU ..	15
3.1 Externí temperačně chladicí systémy.....	16
3.1.1 Konstrukce temperačně chladicího systému vyfukovací formy.....	16
3.1.2 Vliv procesních parametrů na účinnost externích temperačně chladicích systémů	24
3.2 Interní chladicí systémy	30
3.2.1 Výměna tlakového vzduchu.....	30
3.2.2 Podchlazený vzduch.....	36
3.2.3 Atomizovaná voda	43
3.2.4 Oxid uhličitý	45
3.2.5 Dusík	50
3.2.6 Srovnání interních chladicích systémů.....	52
3.3 Další způsoby zvýšení efektivity chlazení vyfukovacího procesu.....	53
4 MATEMATICKÝ POPIS.....	54
4.1 Externí temperačně chladicí systém	55
4.1.1 Tepelná výměna s okolím	55
4.1.2 Tepelná výměna mezi cirkulujícím médiem a dutinou formy	57
4.2 Interní chladicí systém	59
4.3 Tuhnutí polymeru.....	60
5 APLIKOVATELNOST SYSTÉMU VSTŘIKJÍCÍ KAPALNÝ OXID UHLIČITÝ PRO VYFUKOVACÍ PROCES.....	62
5.1 Testované produkty	63
5.2 Připojení CO₂ temperační jednotky do interního chladicího systému vyfukovacího stroje	64

5.3 Optimální nastavení procesu injektáže CO₂	65
5.3.1 Testování optimálního nastavení injektáže CO ₂ separovaného interního systému	68
5.3.2 Testování optimálního nastavení injektáže CO ₂ na vyfukovacím stroji	79
5.4 Experimentální stanovení účinnosti chlazení CO₂ temperačního systému	88
5.4.1 Stanovení chladících charakteristik injektovaného CO ₂	89
5.4.2 Experimentální stanovení navýšení účinnosti chlazení vyfukovacího procesu při aplikaci CO ₂ interního chlazení	107
5.5 Ekonomické posouzení aplikovatelnosti CO₂ chladicího systému	124
6 OPTIMALIZACE PROCESU INTERNÍHO CHLAZENÍ INJEKTÁŽÍ CO₂	129
6.1 Konstrukční optimalizace vyfukovacího trnu	129
6.1.1 Inovativní řešení kalibračního trnu	130
6.1.2 Realizace řešení	131
6.1.3 Průmyslová využitelnost	132
6.2. Inovace temperační jednotky vstřikující zkapalněné plyny	133
6.2.1 Inovativní řešení temperační jednotky	133
6.2.2 Realizace řešení	134
6.2.3 Průmyslová využitelnost	135
6.3 Integrace inovované temperační jednotky vstřikující zkapalněné plyny do extruzního vyfukovacího stoje	136
6.3.1 Inovované řešení	136
6.3.2 Realizace řešení	137
6.3.3 Průmyslová využitelnost	140
7 VLIV INTENZITY ODVODU TEPELNÉ ENERGIE NA VYFUKOVANÉ PRODUKTY	141
7.1 Vliv intenzity odvodu tepelné energie na struktura polymerů	141
7.2 Vliv intenzity odvodu tepelné energie na optické vlastnosti	144
7.3 Vliv intenzity odvodu tepelné energie na deformaci produktů	144

8. EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ Vlivu interního chlazení na VLASTNOSTI VYFUKOVANÝCH PRODUKTŮ	145
8.1 Stanovení vlivu interního chlazení na strukturu polymerů	146
8.1.1 Polarizační mikroskopie	147
8.1.2 DSC analýza.....	148
8.2 Stanovení vlivu interního chlazení na mechanické vlastnosti	152
8.3 Stanovení vlivu interního chlazení na optické vlastnosti	153
8.4 Stanovení vlivu interního chlazení na tvarovou stabilitu produktů	153
9 DISKUZE VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	155
9.1 Diskuze vlivu procesních parametrů CO ₂ interního chlazení na efektivitu chlazení u extruzně vyfukovacího procesu.....	155
9.2 Diskuze chladicího efektu injektovaného CO ₂	155
9.3 Diskuze vlivu rozměrovosti produktu na efektivitu CO ₂ interního chlazení u extruzně vyfukovacího procesu	156
9.4 Diskuze vlivu tloušťky stěny produktu na efektivitu CO ₂ interního chlazení u extruzně vyfukovacího procesu.....	156
9.5 Diskuze vlivu geometrie produktu na efektivitu CO ₂ interního chlazení u extruzně vyfukovacího procesu.....	157
9.6 Diskuze ekonomického zhodnocení aplikovatelnosti CO ₂ interního temperačního systému	157
9.7 Diskuze vlivu CO ₂ interního chlazení na vlastnosti produktů	158
9.8 Diskuze konstrukční optimalizace procesu CO ₂ interního chlazení.....	157
10 PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE	160
11 DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM	161
12 ZÁVĚR.....	163
13 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	166
14 PUBLIKAČNÍ ČINNOST K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE	170
15 SEZNAM PŘÍLOH A PŘÍLOHY	172

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A, B,C	– experimentální varianty chlazení
ABS	– akrylonitril/ butadien/styren
ABS/PC	– polymerní směs akrylonitril/butadien/styren a polycarbonát
ASA	– akrylonitril/styren/akrylester
A _F	– povrch dutiny formy [m ²]
A _k	– kontaktní plochy mezi oběma částmi formy a upínacími deskami [m ²]
A _O	– vnitřní plocha formy (v dělicí rovině) přicházející do kontaktu s okolním prostředím při odformování produktu [m ²]
A _S	– plocha přicházející do kontaktu s okolním prostředím [m ²]
A _{TK}	– povrch temperačního kanálu [m ²]
A _v	– vnitřní povrch dutiny výrobku [m ²]
a _{TM}	– tepelná vodivost [kg/m ² .s]
BAC	– chladicí jednotka „Blow Molding Air Chiller“
BMB	– chladicí jednotka „Blow Molding Booster“
C.A.C.	– metoda interního chlazení pomocí podchlazeného vzduchu „Compresed Air System“
CO ₂	– oxid uhličitý
Cr	– chrom
C _S	– koeficient radiace absolutně černého tělesa [W/m ² .K ⁴]
C _P	– tepelná kapacita média při konstantním tlaku [J/kg.K]
C _{TM}	– měrná tepelná kapacita cirkulující kapaliny při stálém tlaku [J/kg.K]
DHPE	– vysokohustotní polyethylen
D _K	– charakteristický rozměr - průměr kanálu [m]
GIT	– technologie vstřikování s podporou plynu „Gas Injection Technolog“
HMWPE	– vysokomolekulární polyethylen
I.S.C	– metoda interního chlazení pomocí vstřikování atomizované vody „Internal Surface Cooling“ Systém
k	– tepelná vodivost polymeru [W/m ² .K ⁻¹]
LDPE	– nízkohustotní polyethylen
L _{PŘ}	– latentní teplo fázové přeměny [J/kg]
MAG	– metoda svařování v ochranné aktivní atmosféře
MDPE	– středněhustotní polyethylen
m	– hmotnost [kg]
N	– dusík

Ni	– nikl
N _U	– Nusseltovo číslo
PA	– polyamid
PBT	– polybutadien
PBT/ PC	– polymerní směs polybutadienu a polycarbonátu
PE	– polyethylen
PET	– polyethylentereftalát
PP	– polypropylen
PPE	– Poly/phenylene/ether
POM	– polyoxymethylen
PS	– polystyren
PVC	– polyvinylchlorid
Pr	– Prandtlovo číslo
p ₁	– interní tlak [MPa]
\dot{Q}_{BL}	– tepelný tok odebraný plynným médiem [W]
Q _{CO2}	– odebraná tepelné enegie CO ₂ [J]
\dot{Q}_K	– tepelný tok předaný do okolí prouděním (konvekce) [W]
\dot{Q}_L	– tepelný tok předaný do okolí vedením (kondukce) [W]
\dot{Q}_O	– tepelný tok předaný do okolí [W]
\dot{Q}_{Pr}	– vstupující tepelný tok od zahřátého polotovaru (parizon) [W]
\dot{Q}_{Str}	– tepelný tok předaný do okolí sáláním (radiace) [W]
\dot{Q}_{TM}	– tepelný tok odebraný tempračním médiem [W]
Ra	– Reynoldsovo číslo
SB	– styren/butadien
Si	– křemík
T _o	– okolní teplota [°C]
T _{PF}	– teplota povrchu formy [°C]
T _{PK}	– teplota povrchu temperačního kanálu [°C]
T _{PL}	– teplota plynného média [°C]
T _{TM}	– teplota cirkulujícího média [°C]
T _{VP}	– teplota vnitřního povrchu produktu [°C]
T _v	– teplota v tvarové části vyfukovací formy [°C]
T ₁	– počáteční teplota [°C]
T ₂	– konečná teplota [°C]
T1, T2, T3	– interní teploty produktů [°C]
T _{p1} , T _{p2} , T _{p3}	– povrchové teploty produktů [°C]

t	– čas injektáže CO ₂ [s]
t_C	– čas cyklu [s]
t_{OT}	– čas odformování produktu [s]
v_{TM}	– rychlost proudění kapaliny [m/s]
WIT	– vstřikování s podporou vody „Water Injection Technology“
X	– lokace v tloušťce stěny produktu [mm]
α_{BL}	– součinitel přestupu tepla plynného média [W/m ² .°C]
α_{CO_2}	– součinitel přestupu tepla expandujícího kapalného CO ₂ [W/m ² .°C]
β	– koeficient přestupu tepla
δ	– vzdálenost dutiny formy od povrchu temperačního kanálu [m]
ε	– emisivita [W/m ² grd/°C]
λ_F	– součinitel tepelné vodivosti formy [W/m ² .K ¹]
λ_{TM}	– součinitel tepelné vodivosti temperačního média [W/m ² .K ¹]
v_{TM}	– kinetická viskozita kapaliny [m ² /s]
ρ	– hustota polymeru [kg/m ³]
ρ_{TM}	– hustota kapaliny [kg/m ³]

1 ÚVOD

Vyfukování je po technologii vstřikování a vytlačování třetí nejrozšířenější zpracovatelskou technologií polymerních materiálů. Jedná se o nízkotlakou technologii, která má majoritní postavení v produkci více či méně uzavřených výrobků o objemu několika ml až po velkorozměrné produkty o objemu desítek litrů. Vyfukované produkty se uplatňují především v automobilovém, transportním a balicím průmyslu v podobě nádrží na kapaliny, kanystrů, barelů a lahví. Dále při výrobě hraček, elektroniky, farmaceutických potřeb, zahrádkářských, sportovních či volnočasových příslušenství.

V souvislosti s neustálým růstem průmyslové výroby posledních desetiletí adekvátně roste i důraz na kvalitu a produktivitu výroby. Jelikož jsou polymerní materiály obecně špatné vodiče tepla, je z hlediska produktivity výroby, a do značné míry i kvality, nejdůležitější fází výroby proces chlazení. Ten v závislosti na tvaru, velikosti, tloušťce a použitém materiálu produktu činí řádově desítky sekund až minuty, což v procentuálním vyjádření odpovídá 50 – 90 % celkové doby výroby. Chlazení, respektive odvod tepelné energie z roztaveného polymeru, je ve vyfukovacích zařízeních zajišťováno pomocí vnějšího systému, chlazením ve formě a také pomocí plynného média přiváděného do vnitřních částí formy, čili vnitřního chladicího systému. Optimální funkčnost těchto systémů může být nejvíce ovlivněna v počátku procesu, tedy při jeho tvorbě. Nicméně i v již realizovaném procesu lze provést významné optimalizace. Pravděpodobně tou nejjednodušší je změna procesních parametrů. Další a to vysoce efektivní možností je zvýšení teplotně redukčních schopností interního systému. V současnosti existuje několik (externě připojitelných) systémů zajišťující žádaný efekt. Jsou to například systémy produkující vysoce podchlazený stlačený suchý vzduch o teplotách dosahujících až -45 °C, systémy vstřikující směsi vzduchu s atomizovanými kapkami vody nebo zkapalněných plynů, jako oxid uhličitý (-78 °C) nebo dusík (-198 °C).

Z výše uvedených systémů dosahuje jednoznačně nejvyšších účinností vstřikování zkapalněný plynů. Přestože je tato technologie známa po nějakou dobu, ve vyfukovacím procesu doposud nenalézá širší uplatnění. Jedním z důvodů může být nedostatečný rozbor dané problematiky, ze kterého není jednoznačně možné vyvodit obecné závěry o aplikovatelnosti této nekonvenční chladicí metody. Proto bylo cílem realizované výzkumné aktivity podání podrobnějších informací o efektivitě, finanční návratnosti, výhodách a nevýhodách CO₂ temperačních systémů. Kromě testování současných systémů je rovněž dalším cílem práce realizace inovativní temperační jednotky, následná integrace této jednotky do interního rozhraní vyfukovacího stroje a konstrukční optimalizace vyfukovacího trnu.

Výsledkem je získání komplexního vyfukovacího zařízení umožňujícího navýšení efektivity interního chlazení, což v přímém důsledku vede ke zkrácení doby chlazení a tím zvýšení výrobního taktu, respektive produktivity výroby. Dalším, zajisté neméně důležitým aspektem výroby, je kvalita produktů. Proto je rovněž zjištění vlivu intenzity odvodu tepelné energie na užité vlastnosti vyfukovaných produktů věnována adekvátní pozornost. Pro objasnění probíhajících dějů tepelné výměny je součástí práce také matematický rozbor procesu tepelné výměny.

Cíle předkládané práce lze shrnout do následujících bodů:

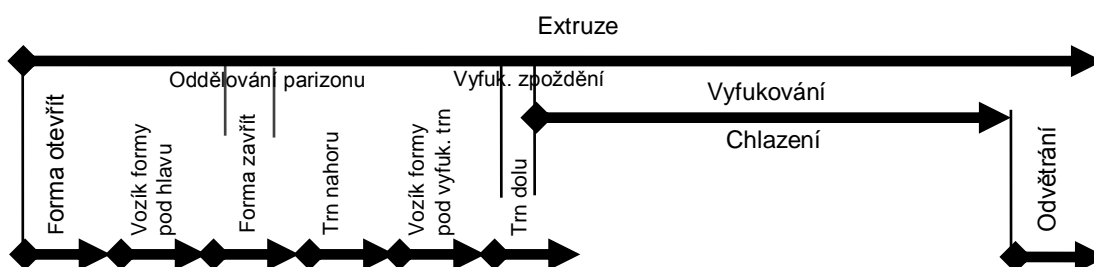
- 1) Rešerše problematiky technologie vyfukování a chlazení vyfukovacího procesu.
- 2) Matematický popis procesu chlazení při aplikaci injektáže zkapalněného oxidu uhličitého.
- 3) Výzkum aplikovatelnosti současných temperačních systémů využívajících chladícího potenciálu oxidu uhličitého.
- 4) Konstrukční optimalizace vyfukovacího trnu určeného pro CO₂ interní chlazení.
- 5) Realizace inovované temperační jednotky vstřikující kapalný oxid uhličitý.
- 6) Realizace integrace inovované temperační jednotky vstřikující kapalný oxid uhličitý do interního rozhraní vyfukovacího stroje.
- 7) Rešerše vlivu intenzity odvodu tepelné energie na technologický proces.
- 8) Výzkum vlivu interního chlazení na kvalitu produktů.

Předkládaná doktorská práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské soutěže /SGS 21005/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

2 TECHNOLOGIE VYFUKOVÁNÍ

Technologii vyfukování polymerních produktů, která tvoří nestacionární, anizotermický, cyklický proces, lze rozdělit na dva základní typy, a to extruzní neboli vytlačovací vyfukování a vstřikovací vyfukování.

Princip technologie *vytlačovacího vyfukování* (obrázek 1), která je jednoznačně nejrozšířenější technologií produkce dutých výrobků (2/3 produkce) [1], spočívá v převedení polymerního materiálu do plastického stavu, kdy hmota vykazuje dostatečnou tvarovatelnost, ale přitom si udržuje potřebnou soudržnost, extruzi polotovaru – parizonu protlačováním taveniny přes příčnou vytlačovací hlavu a tvarování tlakovým vzduchem. Pro zajištění tvarové stability musí být dodaná tepelná energie opět odebrána. Výrobek tedy chladne ve vyfukovací formě za stálého působení tlaku (fáze chlazení). Po dosažení dostatečné tvarové stability dochází k odvětrání tlakového vzduchu, vyjmutí výrobku a následně se celý proces kontinuálně opakuje.



Obr. 1 Schéma sledu pracovních operací vytlačovacího vyfukování

Další vyfukovací technologií, zhotovující více či méně uzavřené duté produkty, je *vstřikovací vyfukování*. Hlavní rozdíl mezi oběma technologiemi spočívá v tvorbě polotovaru zvaného „preforma“, který zde není tvořen extruzí šneku, nýbrž na vstřikovacím stroji. Preforma, která se nachází ještě v plastickém stavu, je následně přesunuta do vyfukovací jednotky, kde dochází stejně jako v předcházejícím případě k tvarování tlakovým vzduchem, chlazení a odformování výrobku. Další možností je oddělení obou výrobních fází. V tomto případě nastává zchladnutí předlisku, jeho přemístění (do jiného výrobního podniku), opětovné uvedení do tvárného stavu a vyfouknutí produktu na vyfukovacím stroji. Výhodou vstřikovacího vyfukování je, že pokud se používá živý vtok, tak prakticky neexistuje technologický odpad. Hrdlo se závitem i dno mají vysokou kvalitu, neboť neobsahují svar. Lze vyrábět předlisky s proměnnou tloušťkou stěny a dosáhnout tak rovnoměrné tloušťky stěny u odstupňovaných výrobků. Nevýhodou je potřeba dvou forem, složité výrobní zařízení. Plast musí být vhodný jak pro technologii vyfukování, tak i pro technologii vstřikování. Velikost výrobků je omezena velikostí předlisku [1].

3 TEMPERAČNÍ SYSTÉMY POUŽÍVANÉ U VYFUKOVACÍHO PROCESU

Jednoznačně nejdelší část z výše představených fází výrobního procesu zaujímá doba chlazení. Ve vyfukovacím procesu je tepelná energie z roztaveného polymeru odebírána pomocí dvou vzájemně závislých chladicích systémů – vnějšího a vnitřního [1]. Za vnější systém je označován temperačně chladicí systém vyfukovací formy, kde je tepelná energie odebírána přestupem tepla mezi stěnou výrobku, stěnou formy a temperačními kanály s cirkulujícím teplotnosným médiem. Vnitřní chladicí systém je systém zajišťující tepelnou výměnu vnitřních částí dutých výrobků prouděním plynného média. Jsou-li porovnány oba systémy, je zřejmé, že vnější chladicí systém dosahuje výrazně vyšších účinností [2], [3], [4]. Důvodem je obecně špatná tepelná vodivost vyfukovacího (chladicího) interního média, kde je standardně používán vzduch o teplotě okolí. Proto je kladen velký důraz na správnost návrhu temperačně chladicího systému vyfukovací formy. Nicméně i v okamžiku, kdy je vyfukovací proces již vytvořen, je možno provést významné optimalizace. Kromě změny procesních parametrů je velmi progresivní způsob, jak zvýšit efektivitu chlazení, zvýšení tepelně redukčních schopností vyfukovacího média. Zvláště použití systémů přivádějících vysoce podchlazené medium se jeví jako velmi zajímavá a efektivní varianta [1], [5], [6]. V následující kapitole je proto proveden rozbor všech zmiňovaných aspektů.

3.1 Externí temperačně chladicí systémy

Maximální efektivita chlazení vyfukovací formy je možno docílit pouze optimálním návrhem temperačního systému společně se správným nastavením procesních parametrů. V následující kapitole jsou uvedeny obecné zásady a doporučení vedoucí k zajištění tohoto pro výrobce nesmírně důležitého cíle.

3.1.1 Konstrukce temperačně chladicího systému vyfukovací formy

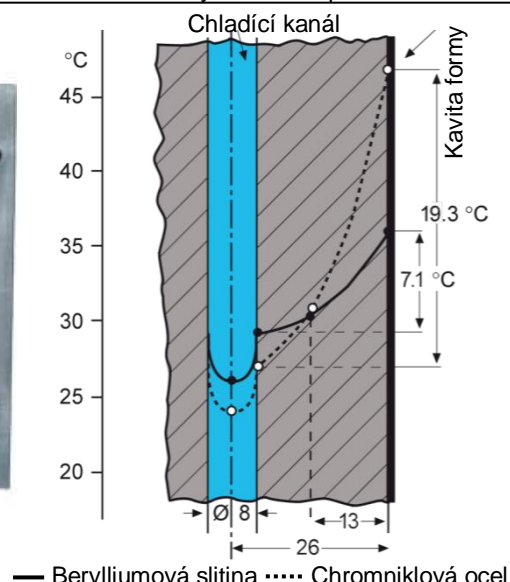
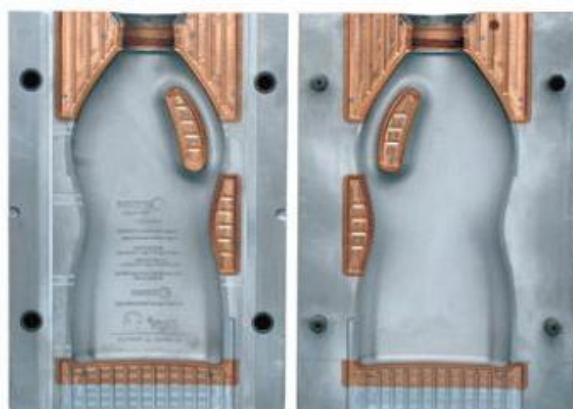
Materiál vyfukovacích forem není vystaven takovým tlakům, jako při technologii vstřikování, což umožňuje použití konstrukčních materiálů nižších pevnostních specifikací [1]. S výhodou tak mohou být využity materiály s vyšší tepelnou vodivostí, jako slitiny hliníku a mědi [7], [8], které díky zintenzivnění odvodu tepelné energie na rozhraní polymer/ forma/ cirkulující médium umožňují zkrácení výrobních časů při současném zrovnoměnění teplotního pole produktu. Použití vysoce teplotně vodivých materiálů však nelze doporučit ve všech případech. V úvahu musí být brány i další požadavky kladené na formy, jako např. životnost formy, odolnost proti opotřebení, poškrábání, pevnost, rozměrová stabilita, obrobiteľnosť, leštitelnosť či snadná manipulovateľnosť [7]. Proto je v následujících

odstavcích proveden krátký rozbor fyzikálních (tepelná vodivost) a mechanických vlastností nejpoužívanějších materiálů vyfukovacích forem. Zároveň je zde diskutována i otázka sériovosti výroby a velikosti produktů.

Ocelové formy, např. P-20; H-13; 420SS, S42000, T51620, mají nejnižší tepelnou vodivost z prezentovaných materiálů, a tedy nejnižší teplotně redukční schopnost. Naopak výhodou těchto materiálů jsou především výborné mechanické vlastnosti zajišťující vyrobitelnost stovek tisíců, až miliónů kusů [1]. Pro docílení, už tak dobré odolnosti proti opotřebení jsou ocelové formy často povrchově kaleny. Kaleny nejsou však formy jako celek, nýbrž místa vystavená vyššímu namáhání. V extruzním vyfukovacím procesu jsou to místa v oblasti hrdla a dna [1].

Z hliníkových slitin se pro vyfukovací formy používají např. 7075-T6511, 7072-T6511, A97075, A96061 či 6016-T6016 [7]. Tyto slitiny mají téměř desetinásobně vyšší tepelnou vodivost než ocel. Díky nízké hustotě hliníku jsou formy lehké. Tuto výhodu oceníme obzvláště při manipulaci a výměně forem. Naopak značnou nevýhodou je malá odolnost proti poškrábání a životnost forem, což je obzvláště nebezpečné při aplikaci materiálů s nízkou viskozitou, kde hrozí riziko obtisknutí rýhy na povrch produktu. Na druhé straně jejich obrobitelnost je výborná [1]. Vzhledem k uvedeným výhodám a nevýhodám jsou hliníkové formy používány především pro menší a středně velké produkty ve středních sériích (250,000 kusů) [1], [7].

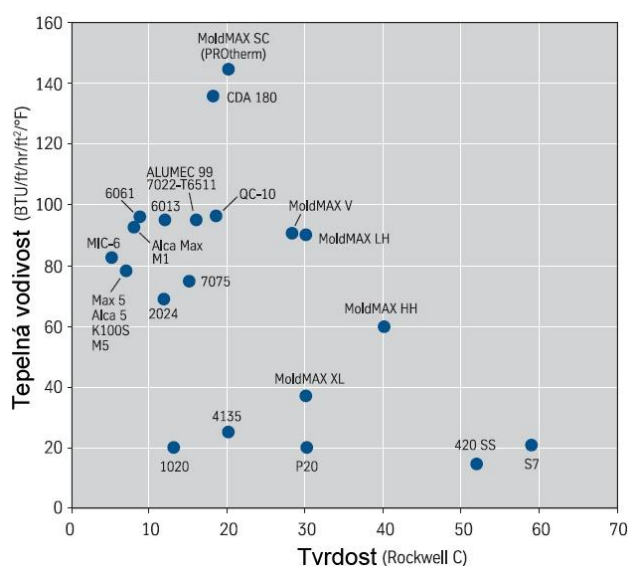
Třetí používanou skupinou materiálů jsou slitiny mědi, zejména pak beryliové (AMPCO 18, AMPCO 21), hliníkové (A608, A609) a vysokolegované slitiny mědi (AMPCO 940, AMPCO 944) [9], [10]. Tyto materiály vykazují velmi vysoké hodnoty tepelné vodivosti. Obdobně jako hliníkové slitiny jsou náchylné na poškrábání, obtížně se opracovávají a jejich životnost je rovněž malá. Co však nejvíce zabraňuje širšímu uplatnění, je jejich cena. Vysoké pořizovací náklady limitují využití tohoto teplotně vysoce vodivého materiálu pouze pro malé výrobky. Častěji jsou slitiny mědi implementovány jen jako tvarové vložky do míst, kde je potřeba lokálně zvýšit odvod tepla [1], [9], viz obr. 2. Ve vyfukovacím procesu to jsou místa dna a oblast hrdla. Zabudováním vložek ze slitin mědi do těchto teplotně problematických míst je tedy zajištěno lokální zintenzivní odvodu tepelné energie, zrovnomnění výsledného teplotního pole produktu, což umožňuje zkrácení potřebného času chlazení. Konkrétní případ navýšení teplotně redukčních schopností vyfukovací formy, je-li aplikován vysoce vodivý materiál, je uveden na obr. 3. Vyšší tepelná vodivost formy z beriliuminové slitiny způsobuje ustavení povrchové teploty na hodnotě o 12,2 °C nižší než v případě použití formy z chromniklové oceli [11].



Obr. 2 Aplikace tvarových vložek ze slitin Cu

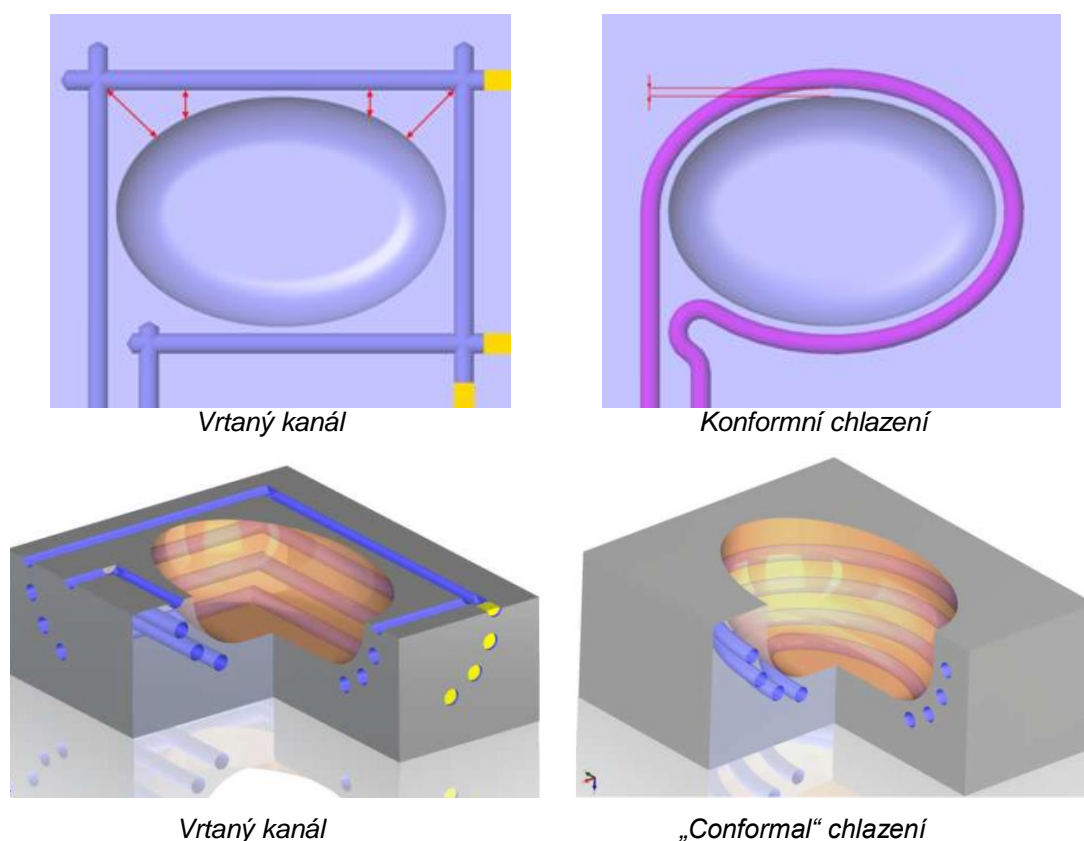
Obr. 3 Srovnání tepelného spádu vybraných materiálů forem [11]

Vzhledem k výše uvedenému je pro zajištění maximální výrobní efektivity vyfukovacího procesu vhodné použít materiál s co možná nejvyšší tepelnou vodivostí. Při volbě materiálu vyfukovací formy je nutno brát v úvahu i další požadavky, jako například počet vyráběných kusů, rozměrovost výrobků a samozřejmě cenu [1]. Pro usnadnění správné volby jsou v obr. 4 porovnány teplotně-vodivostní vlastnosti nejvhodnějších materiálů vyfukovacích forem s jejich tvrdostí. Tvrdost materiálu je zvolena proto, že pomocí této materiálové charakteristiky může být částečně posuzována i odolnost proti opotřebení, poškrábání, leštitelnost či obrobitelnost materiálů. Materiál s vyšší tvrdostí totiž vykazuje vyšší odolnost proti opotřebení, odolnost proti poškrábání, dosahuje lepších schopností se leštit, ale naopak má nižší obrobitelnost a svařitelnost [1], [7].



Obr. 4 Srovnání tepelné vodivosti s tvrdostí vybraných materiálů vyfukovacích forem [7]

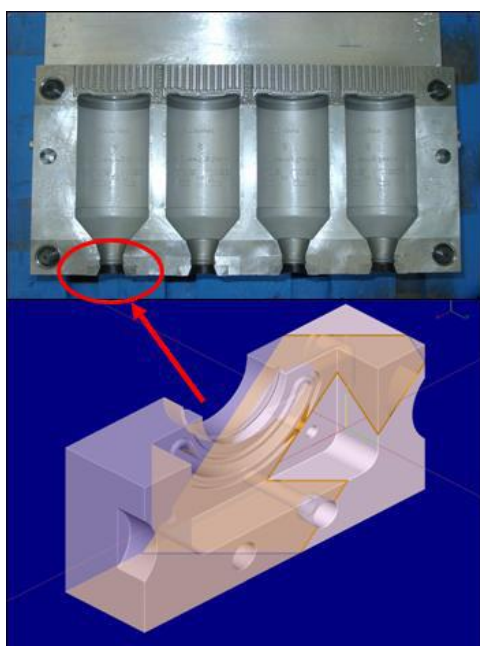
Temperačně chladicí systémy vyfukovacích forem jsou nejčastěji tvořeny vzájemným propojením vrtaných kanálů, o něco méně pak kanály frézovanými [1], [8]. Důvod je nutno hledat v jednoduchosti a ekonomičnosti této výrobní technologie. Technologické limity vrtání, frézování bohužel v některých případech neumožňují optimálně kopírovat tvar produktu. Tyto limity jsou impulzem pro hledání nových cest, které by umožnily rovnoměrněji odvádět tepelnou energii z povrchu výrobku. Relativně novým a zřejmě velice zajímavým řešením je tzv. „konformní“ chlazení [12], kde temperační kanály ideálně kopírují tvar produktu, viz obr. 5.



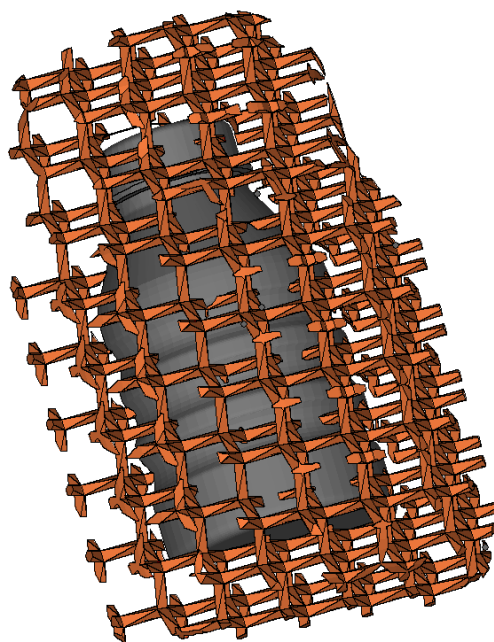
Obr.5 Konstrukční možnosti umístění temperačních kanálů [12]

V současnosti existuje několik výrobních technologií dávajících konstruktérovi požadovanou volnost. Pravděpodobně tou nejrozšířenější je technologie sintrování, také známá pod názvem „Direct Metal Leasing (DMLS)“ nebo „DirectTool“ [12]. V souvislosti s použitím této technologie byla v minulosti vyslovena určitá omezení týkající se především materiálového použití. Na dnešním trhu však již existuje široká nabídka použitelných materiálů s dostatečnými mechanickými vlastnostmi [13]. Jedním z nich je např. EOS Maraging Steel MS1, který dosahuje tvrdosti 34-36 HRC (po povrchovém kalení dokonce 53-88 HRC) a meze pevnosti 1900 MPa [13]. Materiál je možné následně bezproblémově leštit. Z hlediska

životnosti jsou sintrované formy, vzhledem k procesním charakteristikám vyfukování, vhodné pro výrobu menších, až středně velkých sérií. Je však nutno poznamenat, že sintrování je neustále se vyvíjející technologií (především z hlediska materiálového použití), a proto ji možná bude moci v blízké budoucnosti aplikovat i pro rozsáhlejší série. Kromě výroby forem jako celku je funkčně a ekonomicky velmi zajímavou variantou aplikace sintrovaných vložek. Sintrované vložky jsou pak s výhodou využívány k temperování míst běžně nedosažitelných technologií vrtáním či frézováním [14]. Příklad takového řešení je uveden na obrázku 6, kde je sintrovaná vložka s „conformal“ chlazením použita k chlazení hrdla produktu. Výsledkem je zrovnoměnění teplotního pole a možnost zvýšení produktivity výroby čtyř násobné formy o 75 % [14]. Sintrované vložky jsou tak díky možnosti optimálního uspořádání temperačně chladicích kanálů vhodné pro lokální zvýšení efektivity chlazení problematických míst vyfukovacího procesu.



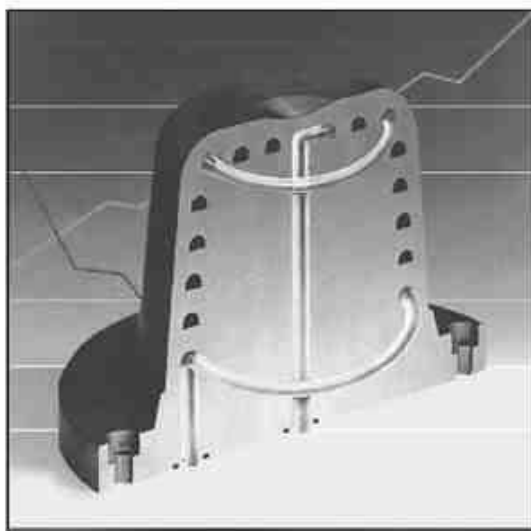
Obr. 6 Příklad aplikace sintrované vložky



Obr. 7 Technologie Tetra Lattice™ [15]

Další technologií zajišťující rovnoměrný odvod tepla je technologie „Tetra Lattice™“. Jedná se o způsob realizace chladicích kanálů připomínající síť metodou vytavitelných modelů, viz obr. 7. Z publikovaných výsledků vyplývá zjištění [15], že aplikací chladicího systému „Tetra Lattice™“ v kombinaci s vysoce-vodivými materiály forem (slitiny mědi) může být docíleno, až čtyřikrát rychlejšího odvodu tepelné energie v porovnání s běžným konvenčním chlazením ocelových forem.

Třetí možností tvorby temperačních okruhů, jež umožňuje kopírovat tvar produktu, je použití systému „kontura“. Systém „kontura“ je představen v obrázku 8. Řešení spočívá v rozdělení tvárnků do více vrstev, které lze na jejich stykových plochách snadno obrábět. Vrstvy tvárnku se na sebe následně ukládají a spojují spojovací technikou pájením na tvrdo za vzniku homogenního tvarového spoje. Ačkoli je systém kontura v současnosti používán především pro technologii vstřikování, nabízí se i aplikační možnosti pro technologii vyfukování.



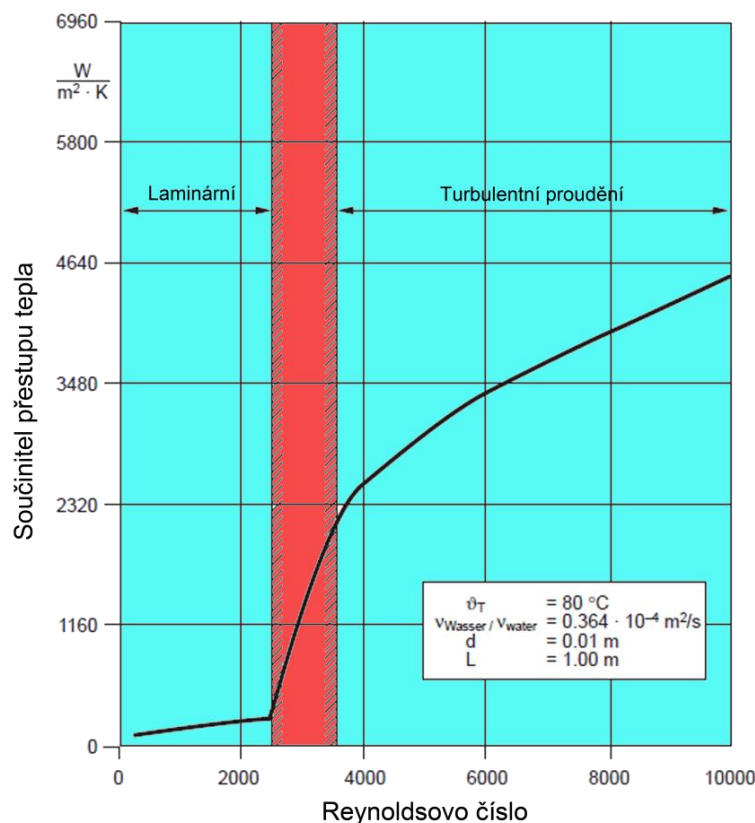
Obr. 8 Temperační systém „kontura“

Z výše uvedeného je zřejmé, že schopnost temperačně chladicích kanálů kopírovat tvar produktu je nesmírně důležitá. Dalším faktorem majícím významný vliv na rychlost a rovnoměrnost odvodu tepla je dimenzování kanálů [1]. Dimenzováním kanálů je myšleno jejich počet, rozměrovost (délka, průměr), umístění a také proudění kapaliny. Všechny tyto faktory vstupují do vzájemné interakce a ovlivňují tak výslednou kvalitu odvodu tepla [1]. Jelikož se jedná o značně obsáhlou problematiku, která primárně není cílem této práce, budou v následujících řádcích uvedena pouze základní obecná doporučení a zásady.

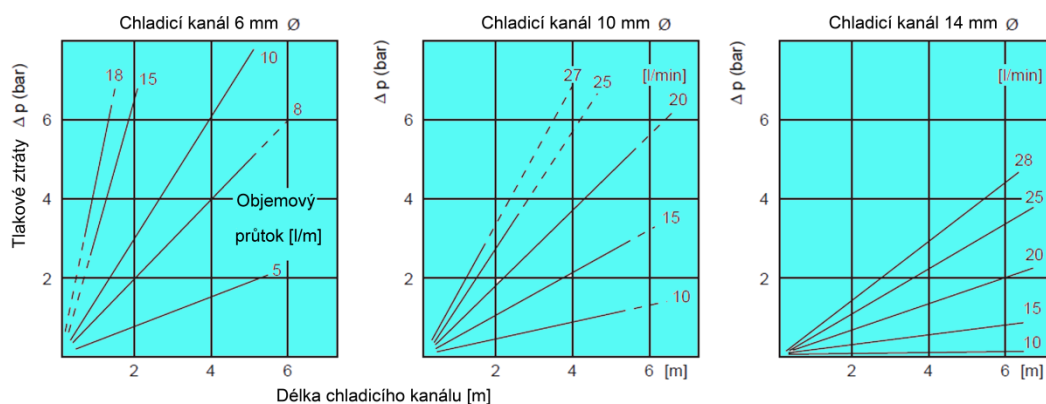
Temperačně chladicí kanály by měly být ideálně umísťovány ve všech místech ve stejné lokaci od dutiny formy [11]. Pro přestup tepla je samozřejmě nejvýhodnější přivést teponosné médium k dutině co nejbližší. V okamžiku, kdy nejsme omezeni tvarem či výrobní technologií, jsou pro umístění temperačně chladicích kanálů limitujícími faktory pouze materiálové vlastnosti formy, její pevnost. Vzhledem k pevnosti formy platí pro umísťování kanálů obecné empirické pravidlo dodržení vzdálenosti od povrchu formy rovné jednoho až dvojnásobku průměru kanálů [16].

Pro stanovení distance mezi kanály platí obdobné pravidlo, tentokrát rovné hodnotám dvoj až trojnásobku průměru kanálů [1], [16]. Diametr průměru kanálů je pro vyfukovací formy volen nejčastěji v rozmezí 4 až 19 mm. Doporučené hodnoty se však pohybují v poněkud užším intervalu, a to 11 až 14 mm [1]. V otázce volby počtu kanálů je za účelem docílení rovnoměrného odvodu tepla doporučeno použití více menších kanálů [1]. S distribucí kanálů souvisí i další z častých chyb, kterých se dopouštějí konstruktéři forem. Touto chybou je pokles tlaku v chladicích kanálech a příliš velký teplotní rozdíl mezi vstupujícím a vystupujícím oběživem. Oba tyto faktory mohou nepříznivě ovlivnit efektivitu a homogenitu odvodu tepla. Dobře navržená forma by měla mít minimální tlakové skoky, celkový pokles tlaku menší než 0,3 bary a teplotní rozdíl kapaliny pod úrovní hodnoty 1,8 °C (ideálně 1,5 °C) [1]. Je vhodné se vyvarovat použití příliš malých kanálů, které směřují k nepříznivým tlakovým skokům. Vyhnout se slepým temperačním kanálům a vzduchovým kapsám. Minimalizovat tepelnou výměnu mezi strojem a nástrojem. Používat více chladicích okruhů kratších délek. Okruhy by měly být v místech největších tloušťek materiálů odděleny. Rozdíly v odporu proti tečení média je možné částečně eliminovat změnou průřezu. Tlakovým ztrátám může být také zčásti předejito pomocí paralelního propojení kanálů. Se ztrátami a teplotními rozdíly je však nutné počítat a vhodně tak dimenzovat chladicí systém (kapacita čerpadla) [1].

Posledním důležitým prvkem dimenzování temperačního systému je proudění kapaliny. Z hlediska efektivity přestupu tepla je vhodné rozdělit proudění na laminární a turbulentní. Za laminární proudění je považováno proudění s Reynoldsovým číslem (Re) menším než 2320 a za turbulentní proudění, proudění s Re vyšším jak 40000 [11]. Z obrázku 9 je zřejmá důležitost typu proudění na efektivitu chlazení. Turbulentní proudění totiž dosahuje, až tisícinásobně vyšší součinitel přestupu tepla, což má na proces odvodu tepla zásadní vliv [11]. Pro optimální funkci temperačního systému proto musí být navržen takový systém, který zajišťuje právě tento stav proudění. Z hlediska proudění teplotnosného média je považováno používání kanálů větších diametrů, jako např. 19 mm za neekonomické [1]. Vyšší rozměry totiž vyžadují vyšší průtok chladicího média, viz obr. 10, což klade značné nároky na potřebné zařízení. Otázka rychlosti proudění kapaliny a viskozity kapaliny nebude v této kapitole rozebírána. Podrobnému rozboru však bude vystavena v následující kapitole zabývající se technologickými parametry.



Obr. 9 Závislost součinitele přestupu tepla na Reynoldsovu číslu pro vodu [11]



Obr. 10 Vliv geometrie kanálu a objemového průtoku na tlakové ztráty [11]

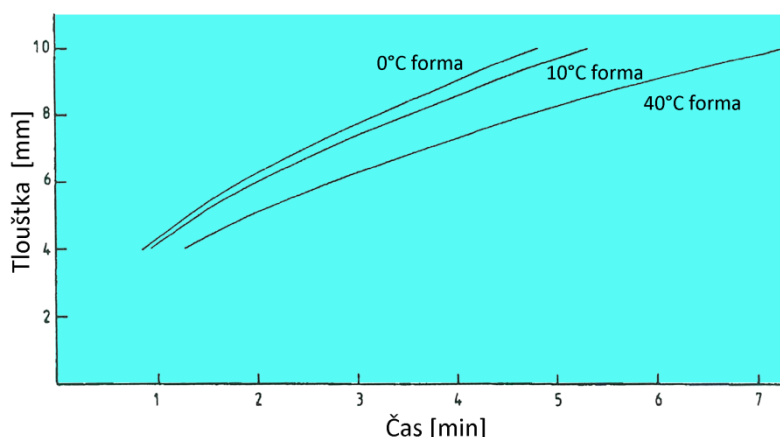
Kromě uvedených faktorů má na kvalitu turbulentního proudění vliv i povrch kanálů či jejich geometrie [17]. Pro turbulentní proudění je výhodné, když je povrch kanálů hrubý, což je devizou vrtaných kanálů. Nicméně vrtané kanály vytvářejí díky jejich geometrickým omezením podstatně vyšší odpor proti toku než např. kanály ideálně kopírující tvar produktu. Tato skutečnost má na kvalitu proudění také významný vliv [12].

3.1.2 Vliv procesních parametrů na účinnost externích temperačně chladicích systémů

Nejjednodušší a nejčastěji aplikovatelný způsob řízení technologického procesu je změna procesních parametrů. Na dobu chlazení, a tedy i produktivitu výroby mají nejvýznamnější vliv především: tloušťka produktu, teplota polotovaru (parizonu, preformy), teplota a rychlost proudění chladicího média, a také vyfukovací tlak [1], [18].

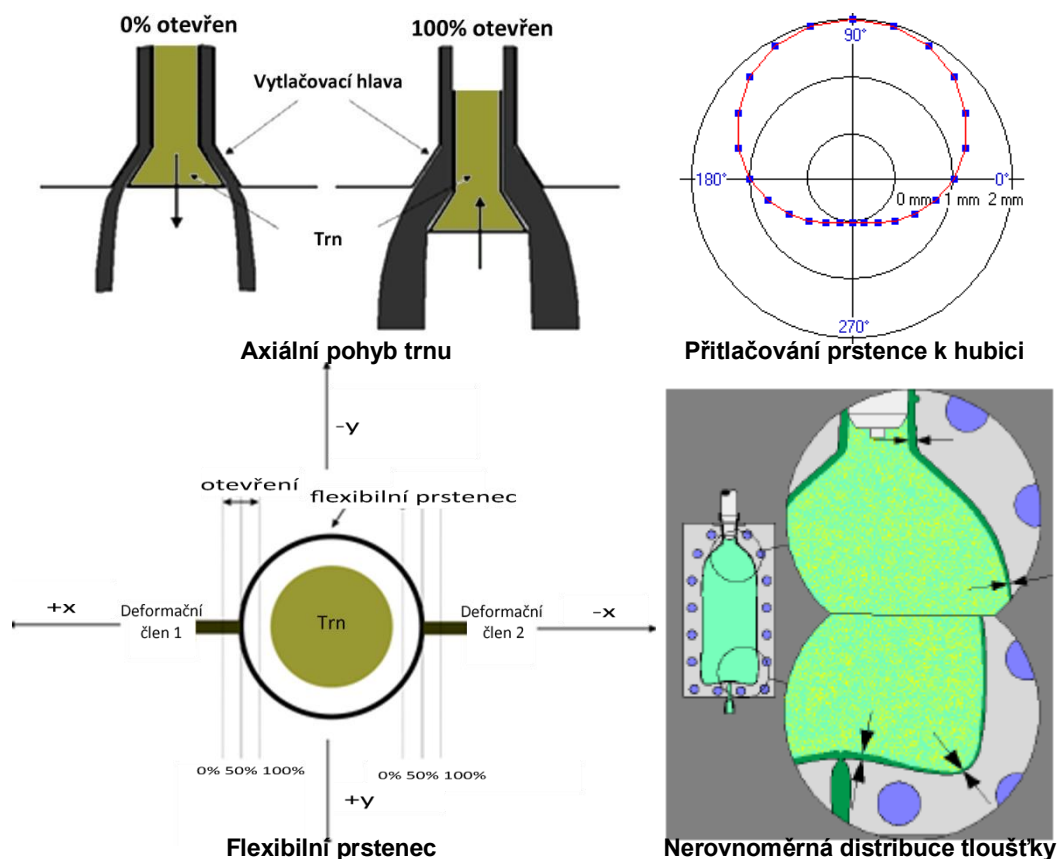
Tloušťka stěny produktu

Tloušťka stěny produktu je jedním z hlavních faktorů, který předurčuje potřebný čas chlazení. Pro usnadnění představy o vzájemné interakci těchto dvou činitelů je na obrázku 11 znázorněna závislost času potřebného k ochlazení PE produktu z teploty 180 °C na 90 °C [19]. Ze zobrazených závislostí je také evidentní nárůst významu teploty vyfukovací formy, respektive teploty nosného média s rostoucí tloušťkou stěny produktu.



Obr. 11 Závislost doby potřebné k chlazení na tloušťce stěny produktu [11]

Kromě parametru tloušťky stěny je velmi významným prvkem její rovnoměrnost rozložení. Velké rozdíly v tloušťce stěny totiž kladou značné nároky na temperačně chladicí systémy a velmi často způsobují vznik nehomogenního teplotního pole produktu, a tedy i vznik teplotních extrémů, které limitují čas výroby. Je tedy nanejvýše důležité zajistit rovnoměrnou tloušťku stěny produktu. U moderních extruzních vyfukovacích strojů je tato problematika řešena (více či méně úspěšně) programovatelným průběhem vytlačování. V obrázku 12 jsou znázorněny tři základní možné způsoby korekce tloušťky. Tloušťku lze variovat buď axiálním pohybem trnu v hubici, přitlačování prstenců v hubici na parizon, anebo použitím flexibilního prstence, kde dva pohony (např. servo-hydraulické) deformují dynamicky flexibilní prstenec pomocí natahování a stlačování (zároveň je možno použít axiální změny polohy vytlačovacího trnu či hubice) [20].



Obr. 12 Způsoby řízení tloušťky stěny vytlačovaného parizonu [6], [20]

Teplota polotovaru

Rovněž teplota polotovaru je pro chladicí proces zásadním parametrem [3]. Se zpracovatelskou teplotou totiž roste i množství tepelné energie, které je zapotřebí odvést, a tím i čas potřebný k chlazení. Norman C. Lee ve své publikaci uvádí [8], že snížení teploty parizonu, preformy o 5 °C umožňuje zkrácení potřebného času chlazení přibližně o 1 s. Z hlediska procesu chlazení je tedy výhodnější používat co nejnižší zpracovatelské teploty. Na druhou stranu s poklesem iniciační teploty polotovaru klesá jeho tvárnost, roste riziko nedostatečného vytvarování produktu a potřebný vyfukovací tlak. Pro usnadnění správné volby jsou v tabulce 1 uvedeny doporučené zpracovatelské teploty nejběžnějších polymerních materiálů používaných pro vyfukování.

Tab.1 Doporučené zpracovatelské teploty materiálů používaných pro vyfukování [8]

Materiál	Teplota [°C]	Materiál	Teplota [°C]
LDPE	130-180	PA	240-270
MDPE	150-200	POM	150-280
DHPE	160-220	SB	170-210
HMWPE	180-230	ASA	200-230
PVC	190-205	ABS	180-230
PP	200-220	ABS/ PC	230-250
PS	280-300	PPE	240-250
PBT	245-260	PBT/ PC	240-260

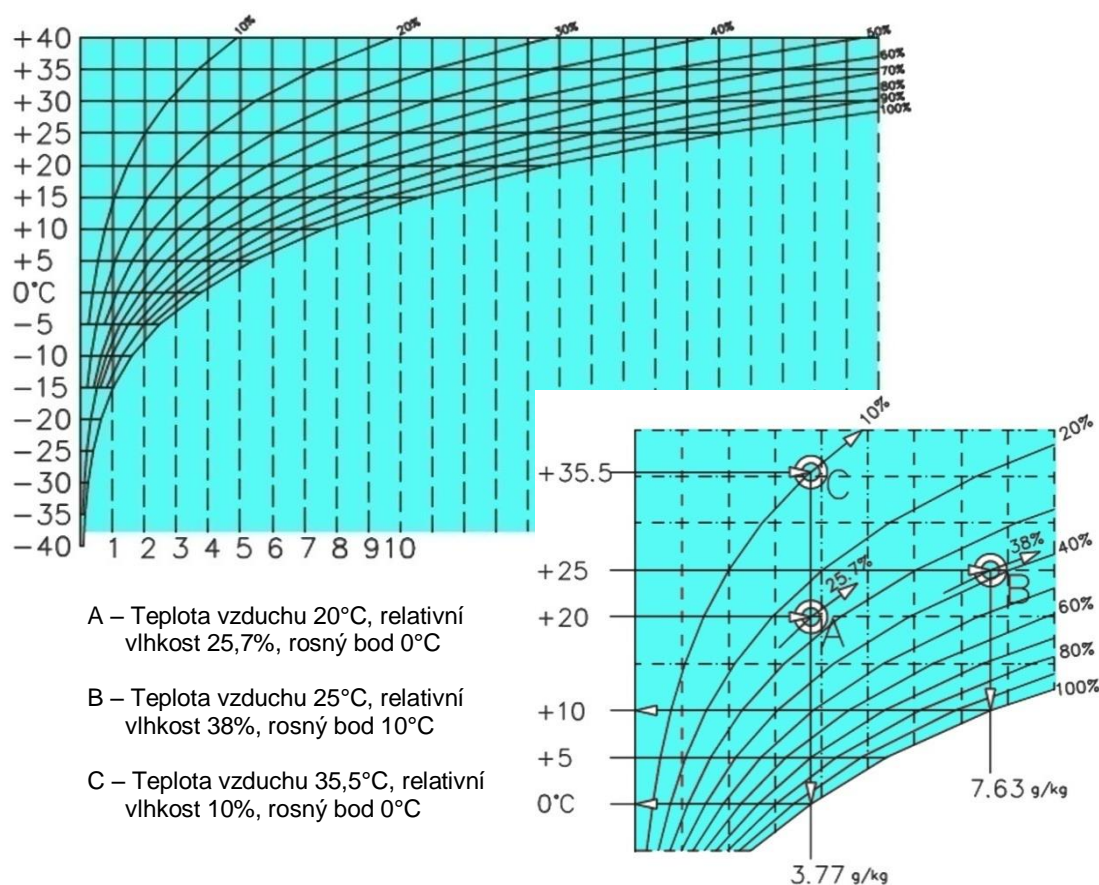
Teplota cirkulujícího média

Pro temperačně chladicí systémy vyfukovacích forem je nejčastěji používané chladicí médium voda [1], která dostatečně dobře splňuje ekonomické i ekologické požadavky. Voda má navíc v porovnání s další použitelnou tekutinou, kterou je například olej, více jak desetinásobně větší tepelnou vodivost [11]. Vzhledem k rozdílným vlastnostem polymerních materiálů a požadavkům na výrobky nelze doporučit jednu optimální teplotu temperace, nýbrž každý materiál musí být posuzován individuálně. Například PET musí být chlazen velmi rychle pro zajištění potlačení krystalizace a dosažení požadovaných optických vlastností. Naopak jiné materiály, jako např. POM, vyžadují aplikaci vyšších teplot [1]. V tabulce 2 jsou uvedeny příklady doporučených temperačních teplotních rozsahů pro vybranou skupinu materiálů.

Tab. 2 Příklady doporučených teplot temperace formy u vybraných materiálů [1]

Materiál	Teplota [°C]	Materiál	Teplota [°C]
POM	80-100	PMMA	40-60
PA	20-40	PS	40-65
PVC	15-30	PE	15-30
PC	50-70	PP	30-60

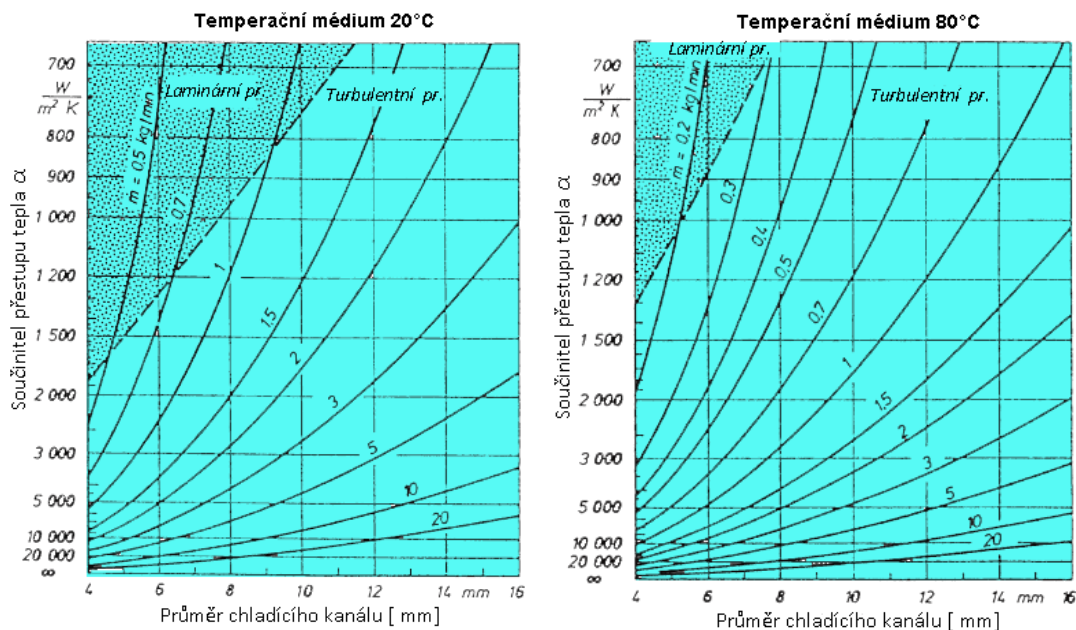
V technické praxi se nejvíce uplatňuje cirkulující médium o teplotách pohybujících se v rozsahu 4 až 20 °C [1]. S klesající teplotou samozřejmě roste účinnost chladicího systému. Je tedy logické, že výrobci se snaží o prosazení aplikace co nejnižších teplot. V souvislosti s použitím nízkých temperačních teplot a intenzivním odvodem je však nutno upozornit na nebezpečí nežádoucí změny struktury, zvýšení hodnot vnitřního pnutí či nebezpečí vzniku lokálních deformací [21], [22]. Další riziko, které nesmí být opomenuto, je rosení forem. Kondenzace vody na povrchu forem je nebezpečná jak z hlediska bezpečnosti práce, tak kvality produktu. Ke vzniku tohoto nežádoucího jevu dochází při kombinaci procesních a klimatických podmínek, kdy klesá teplota povrchu formy pod rosný bod okolního prostředí, což způsobuje vznik povrchových vad výrobků, jako „vrásnění povrchu“, skvrn, propadlin či dokonce děr [1]. Jak vyplývá z obrázku 13, význam rosení forem ještě roste v měsících a klimatických oblastech s výskytem vysoké vzdušné vlhkosti. Dle Mollireova diagramu má na teplotu rosného bodu neboli stav prostředí, kdy je vzduch parami nasycen, zásadní vliv právě hodnota relativní vlhkosti vzduchu.



Obr. 13 Stanovení rosného bodu z Molliérova diagramu [6]

Rychlost proudění cirkulujícího média

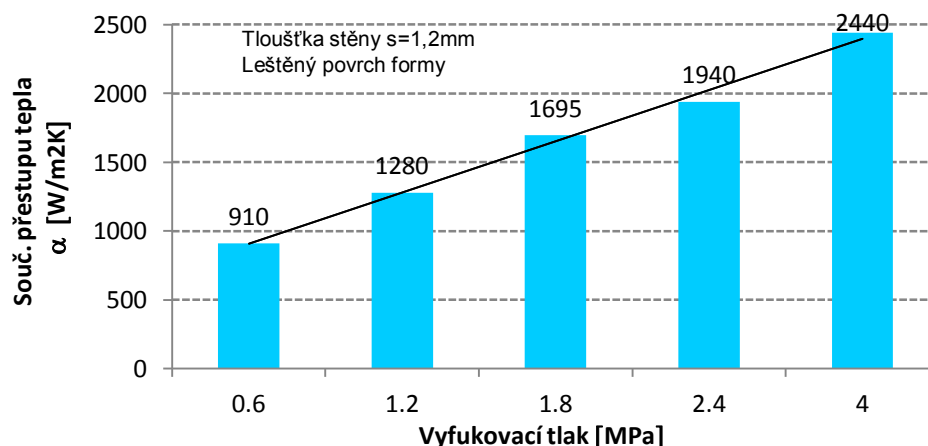
Po teplotě cirkulujícího média je pro optimální (maximální) funkčnost temperačně chladicího systému ještě důležitějším procesním parametrem rychlost proudění kapaliny [3]. Z minulé kapitoly je již známo, že maximální efektivita chlazení je dosažena při turbulentním proudění s co nejvyšším Reynoldsovým číslem. Tento stav lze zajistit vhodným návrhem temperačních okruhů a rychlostí proudícího média, která by měla být co možná nejvyšší. Příklad vlivu rychlosti proudění na schopnost odvádět tepelnou energii je znázorněn v obrázku 14. Z obrázku je zřejmé, proč není doporučováno používat rychlosti proudění nižší než 10 l/min [1]. Použití vysokých rychlostí proudění s sebou přináší i některá rizika. Při příliš vysokých rychlostech by mohlo například dojít k poškození ucpávek a následnému narušení chladicího okruhu. Se zvyšující se rychlostí rostou i tlakové ztráty. Dále je nutné si uvědomit, že voda často obsahuje velké množství minerálních látek a nečistot, které po určitém časovém úseku způsobí jejich usazování a také korozi. Výsledkem je snížení skutečného průtočného průřezu kanálu.



Obr. 14 Vliv diametru kanálu a rychlosti proudění na součinitel přestupu tepla [11]

Vyfukovací tlak

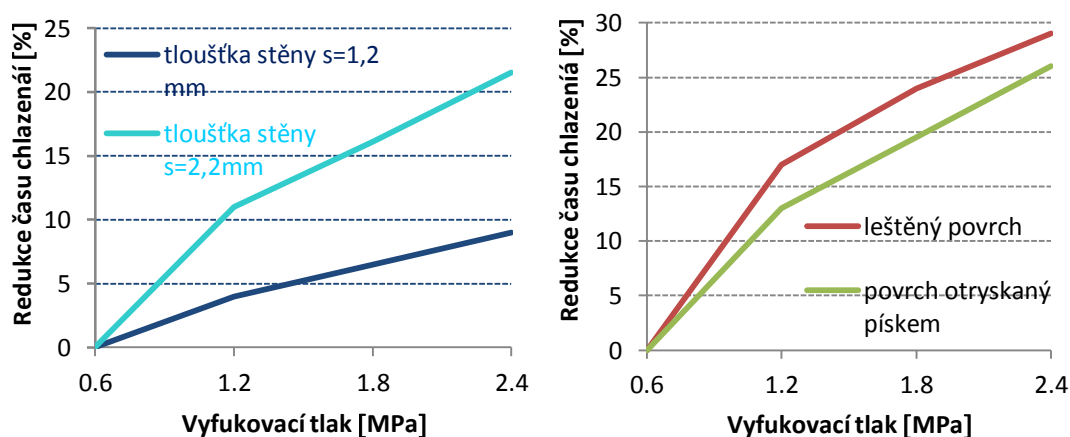
Vyfukovací tlak je mnohdy opomíjený parametr mající vliv na rychlost odvodu tepla. Příčinu významu tlaku je nutno hledat v přestupu tepla mezi polymerem a formou. Efektivita přestupu tepla je totiž závislá na kvalitě kontaktu povrchu formy s chladnoucí stěnou produktu [12], který ve skutečnosti není ideální. Následkem je vznik dalšího rozhraní tvořeného vrstvou vzduchu, což je velmi nežádoucí, jelikož vzduch díky nízké tepelné vodivosti výrazně snižuje efektivitu chladicího procesu. Pro optimální využití temperačního systému formy je tedy nutno zajistit maximální kontakt polymeru s formou, a to během celé fáze chlazení. Ve vyfukovacím procesu je běžně používán průmyslově stlačený vzduch o tlacích 0,2 - 1 MPa (pro extruzní vyfukování 0,2 - 0,6 MPa, 0,55 – 1 MPa pro vstřikovací vyfukování) [1]. Obecně se dá říci, že vyšší tlak zajišťuje vyšší kontakt polymeru s povrchem formy, čímž dochází k zvýšení přestupu tepla a tedy i chladicí účinnosti. V obrázku 15 jsou znázorněny výsledky experimentálního rozboru této problematiky provedeného G. Schmittem. Zobrazené závislosti vlivu velikosti vyfukovacího tlaku na součinitel přestupu tepla potvrzují vyřčená tvrzení.



Obr. 15 Závislost součinitele přestupu tepla na vyfukovacím tlaku [12]

Kromě velikosti tlaku je pro optimální kontakt stěny produktu s vyfukovací formou velmi důležitá i teplota polotovaru, jeho tloušťka a také drsnost povrchu formy, viz obr. 16. Jak již bylo uvedeno, s klesající teplotou polotovaru klesá také jeho tvárnost, a je tedy obtížnější dosáhnout optimálního kontaktu s povrchem formy. Tloušťka stěny produktu má obdobný charakter. S rostoucí tloušťkou stěny produktu je stále obtížnější dosáhnout požadovaného kontaktu. Ze zobrazených závislostí je také patrné, že význam velikosti vyfukovacího tlaku klesá se zmenšující se tloušťkou produktu. Z důvodu dosažení maximálního kontaktu mezi chladnoucí stěnou produktu a formou je nejvýhodnější používat formy s co nejnižší drsností. Zejména leštěné povrchy se jeví jako velmi výhodné [12].

V otázce volby parametru vyfukovacího tlaku lze tedy jednoznačně deklarovat, že použití vyšších tlaků vede ke zvýšení účinnosti chladicích systémů. Nicméně v souvislosti s aplikací vysokých tlaků je vhodné upozornit na možnost negativního ovlivnění kvality produktu. Vyšší tlaky totiž evokují zvýšení vnitřního prnutí výrobku [22].



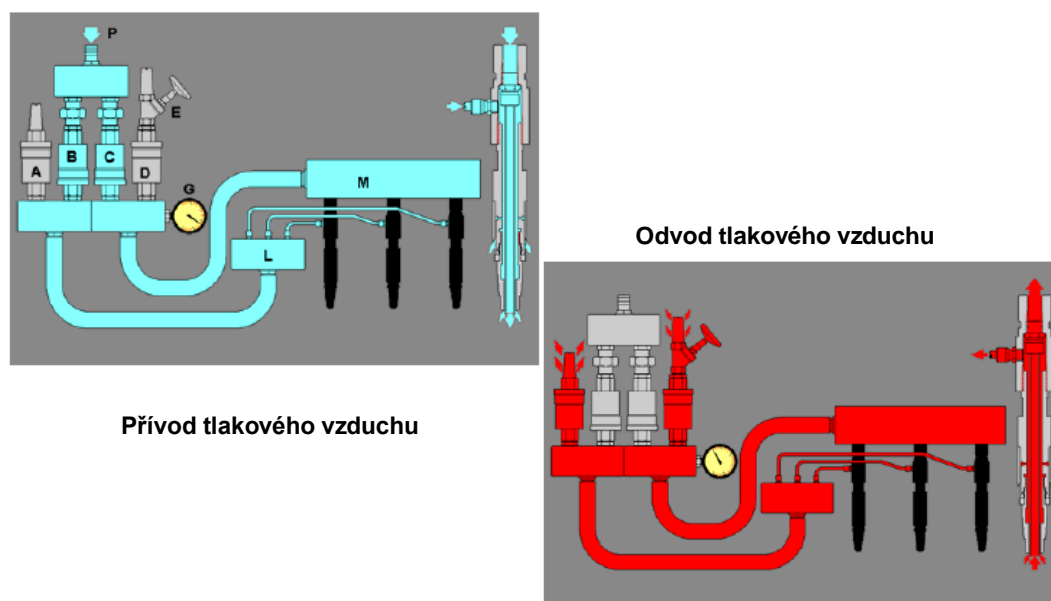
Obr. 16 Vliv tlaku - tloušťky stěny- drsnosti povrchu na efektivitu chlazení [12]

3.2 Interní chladicí systémy

Interní chladicí systém vyfukovacího procesu je systém odebírající tepelnou energii z vnitřních prostor dutých výrobků. V současnosti existuje několik způsobů odvodu tepelné energie z těchto lokací. Pravděpodobně tím nejstarším je několikanásobná výměna běžného tlakového vzduchu. Modernější a zajisté také efektivnější chladicí variantou je aplikace podchlazeného stlačeného suchého vzduchu o teplotách dosahujících až $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5], aplikace systémů vstřikující směsi vzduchu s atomizovanými kapkami vody [8] či vstřikování zkapalněných plynů jako dusík ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) a oxid uhličitý ($-78\text{ }^{\circ}\text{C}$) [6]. Použitím těchto vysoce-efektivních systémů může být docíleno výrazného navýšení chladicího potenciálu vyfukovacího procesu, které umožňuje zkracování výrobních času v rozsahu 10 až 80 % [23].

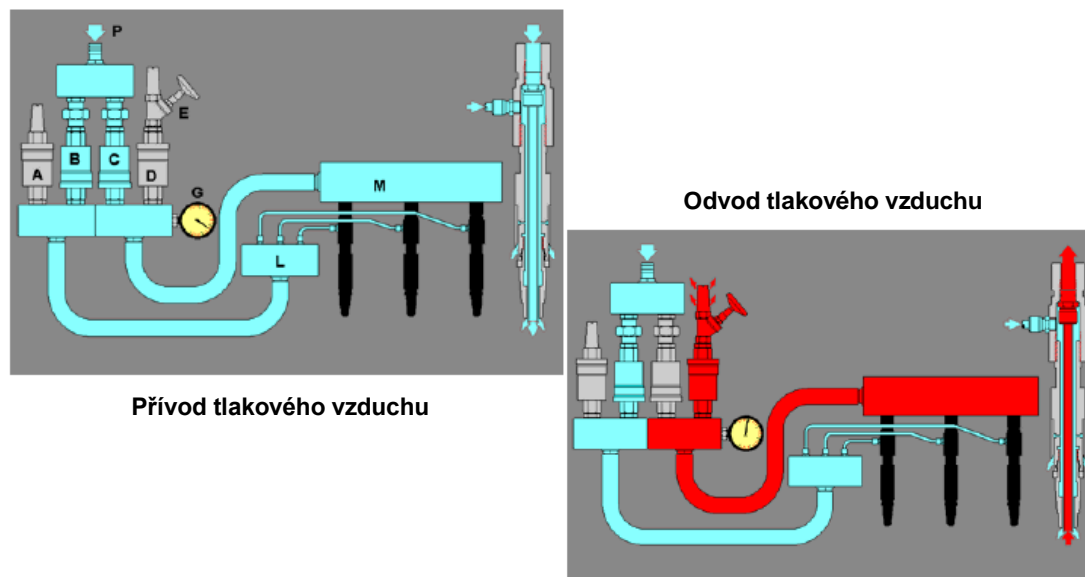
3.2.1 Výměna tlakového vzduchu

První zmínky o zefektivnění procesu interního chlazení jsou evidovány již v šedesátých letech dvacátého století [2], kdy pracovníci Ingersoll - Randsovi společnosti (Impco Division, Nashua) využili sekvenčního otvírání přívodních a odvětrávacích ventilů k výměně běžného tlakového média. Princip této chladicí metody je zobrazen na obr. 17. První fáze vyfukovacího procesu probíhá běžným způsobem. Přívodní (B,C) a rozvodové (M,L) ventily jsou otevřeny, odvětrávací ventily jsou zcela uzavřeny. Hodnota vyfukovacího tlaku je držena na maximální hodnotě až do okamžiku dostatečné tvarové stability produktu. Následuje odvedení zahřátého média otevřenými odvětrávacími ventily (A, D), uzavření ventilů a přivedení nového tlakového média. Proces výměny je několikanásobně opakován.



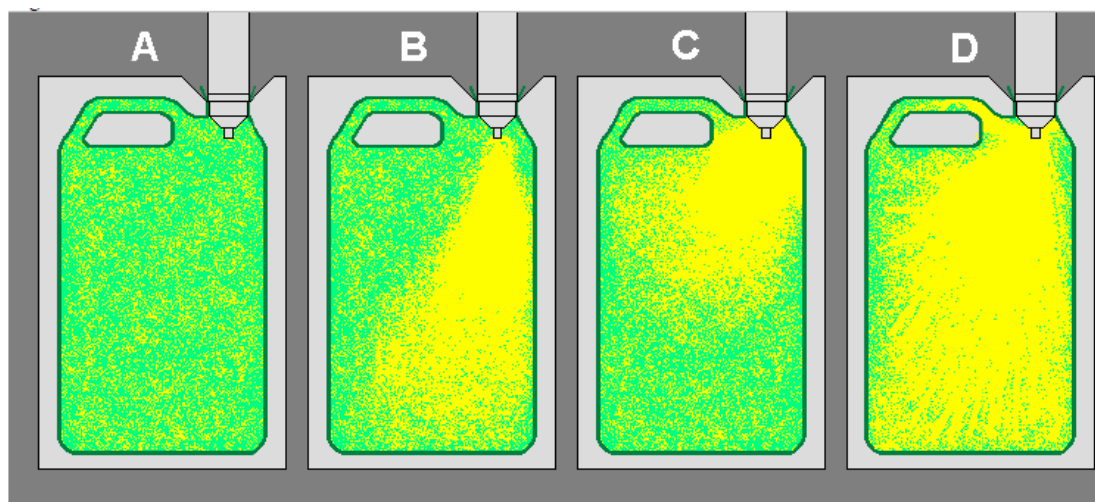
Obr. 17 Zefektivnění procesu chlazení několikanásobnou výměnou tlakového vzduchu

Výhodou této chladicí varianty je snadná aplikovatelnost, při které není zapotřebí větších investičních nákladů. Nicméně vzhledem k poklesu tlaku v dutině formy během fáze odvětrávání lze předpokládat v procesu chlazení snížení účinnosti externího temperačního systému. Proto se jeví jako výhodnější využití kontinuálního nastavení procesu chlazení, tzn. nepřerušovaný přívod a současný odvod média (otevřený ventil B, D). Varianta kontinuálního nastavení procesu interního chlazení tlakovým vzduchem je zobrazena na obrázku 18.



Obr. 18 Zefektivnění procesu chlazení kontinuální výměnou tlakového vzduchu

Na výslednou účinnost představeného interního způsobu chlazení mají nejvýznamnější vliv především hodnoty tlaku a množství použitého plynného média [6]. U množství přiváděného média samozřejmě platí, že je-li použit vyšší objem média, je odebraná tepelná energie vyšší, než v opačném případě. Nicméně závislost mezi množstvím použitého média a efektivitou chlazení není lineární. Například je-li aplikována desetinásobná výměna, je docíleno 10 % zefektivnění produkce, ale pouze 15 % navýšení produktivity při dvacetinásobné výměně média [6]. Parametry tlaku a průtočného množství lze během procesu výměny regulovat prostřednictvím nastavení otevírání přívodních, odvětrávacích redukčních ventilů (E) a také pomocí nastavení délky přívodu a odvodu média. Správné nastavení těchto parametrů musí zajistit optimální výměnu a distribuci média, tzn. dosažení všech kritických míst produktu. Hodnota zpětného tlaku musí být dostatečně velká pro udržení kontaktu mezi produktem a povrchem formy, zároveň dostatečně nízká pro docílení optimální výměny média ve všech částech produktu a zajištění turbulentního proudění, viz obrázek 19.



Obr. 19 Vliv nastavení parametrů procesu výměny tlakového vzduchu na kvalitu interního chlazení [6]

A – interní chladicí proces s několikanásobnou výměnou tlakového vzduchu, fáze plnění polotovaru stlačeným vzduchem

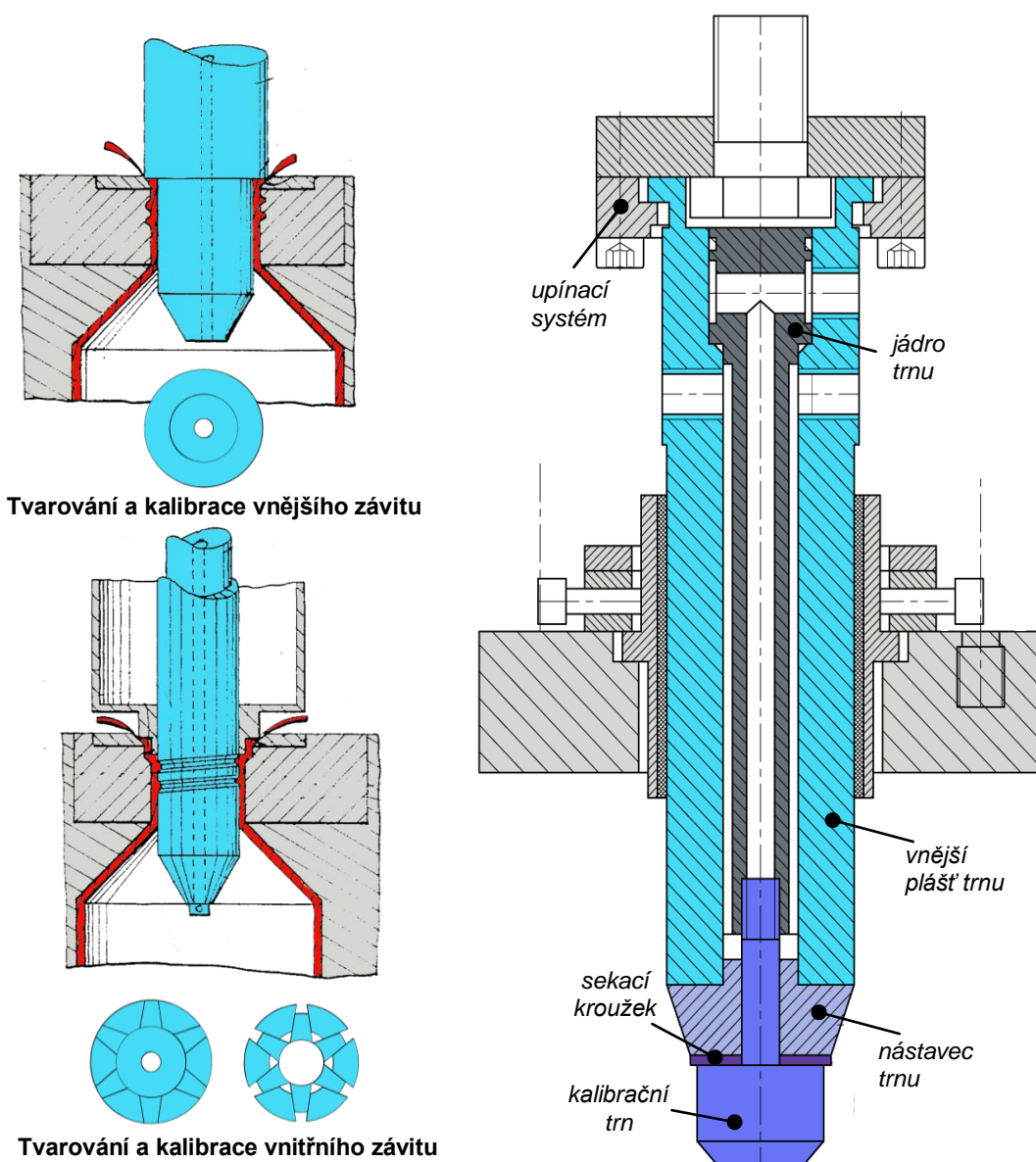
B – interní chladicí proces s kontinuální výměnou tlakového vzduchu, kde vyfukovací trn není ideálně navržen a vzduch je veden pouze na dno produktu.

C – interní chladicí proces s kontinuální výměnou tlakového vzduchu, kde je příliš vysoký zpětný tlak, který zabraňuje výměně média ve spodní části produktu.

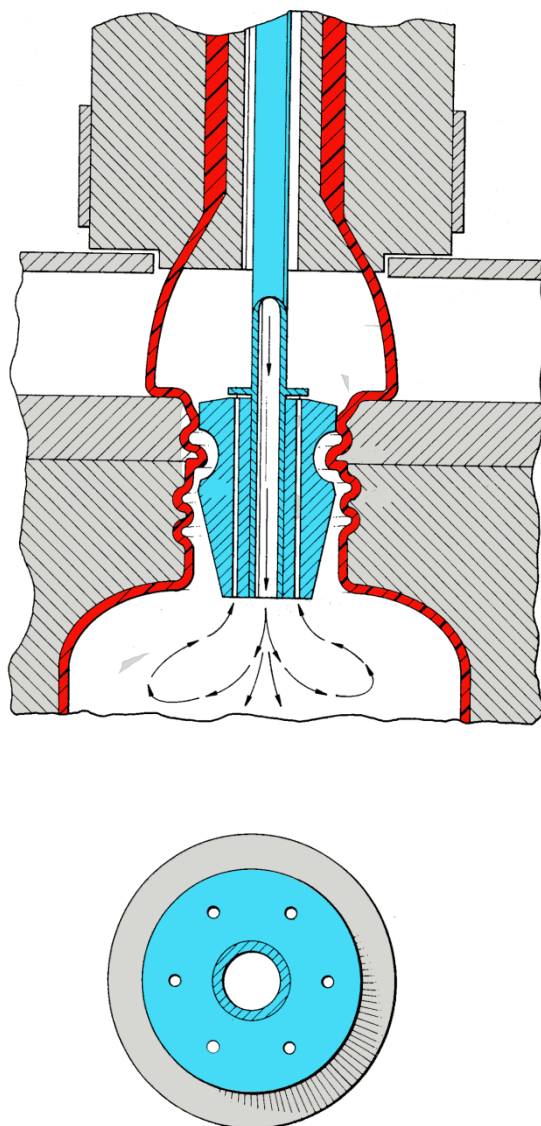
D – interní chladicí proces s kontinuální výměnou tlakového vzduchu, kde je správně nastavena hodnota zpětného tlaku

Z obrázku 19 je zřejmé, že kromě nastavení procesních parametrů je pro optimální výměnu chladicího média v dutině formy nesmírně důležitým prvkem způsob jeho přívodu a odvodu. Ve vyfukovacím procesu jsou k tomuto účelu nejčastěji využívány vyfukovací trny [1], které plní současně několik úkolů. Těmito úkoly jsou přívod a odvod tlakového média do a z dutiny formy, vylisování a kalibrace hrdla produktu, a také odvedení části tepelné energie z ústí produktu. Příklad běžného řešení vyfukovacích trnů je zobrazen na obrázku 20. Standardní vyfukovací trny jsou složeny z několika demontovatelných součástí (upínací systém, vnější plášť trnu, jádro trnu, nástavec trnu, sekací kroužek, kalibrační trn, atd.). Z hlediska procesu interního chlazení je nejdůležitějším prvkem sestavy kalibrační trn, jehož geometrie je tvarově uzpůsobena jednotlivým produktům, a proto musí být zajištěna i snadná výměna. Přívod a odvod tlakového média do kalibračního trnu je standardně realizován jedním kanálem umístěným ve středu trnu, což umožňuje využití pouze cyklického způsobu interního chlazení tlakovým vzduchem. Má-li být využito výhod kontinuální varianty výměny chladiva, je nutné zajistit cirkulaci média. Ve vyfukovacím trnu je zapotřebí provedení konstrukčních úprav. Příklad možného

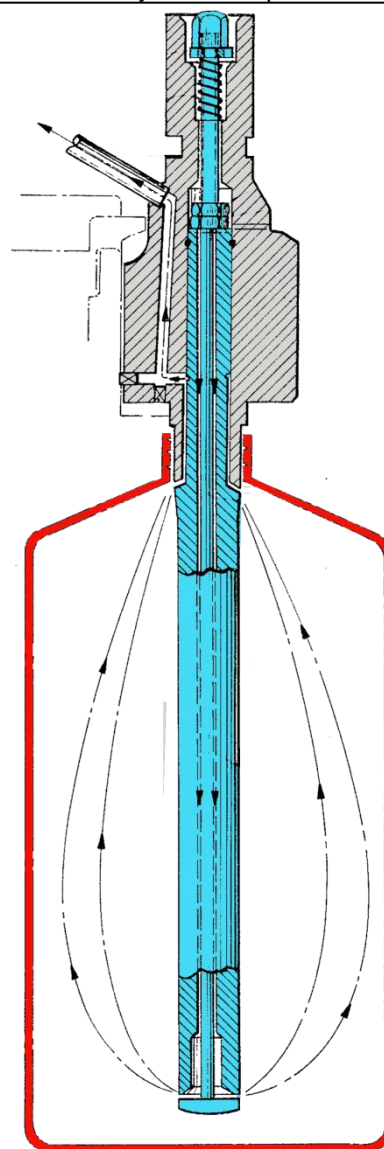
řešení je znázorněn na obrázku 21, kde je kontinuální odvod tlakového média zajištěn vytvořením průchozích kanálů v těle kalibračního trnu. Jinou konstrukčně komplikovanější variantu představuje obrázek 22. Vyfukovací trn je zde za účelem dosažení optimální cirkulace média, která je obtížně dosažitelná zejména pro produkty větších rozměrů, prodloužen až do lokací dna produktu. Prodloužení trnu tak zaručuje rovnoměrnou distribuci proudění chladícího média ve všech lokacích produktu a dosažení efektivní teplotní redukce vnitřních prostor dutých výrobků. Tlak v dutině formy (zpětný odpor) je zde možno redukovat vymezením distance v odváděcí zóně [24]. Nevýhodou této výrobní varianty jsou zvýšené nároky na pohybovou jednotku vyfukovacího systémů. Jednotka vyžaduje možnost aplikace velkého zdvihu, který ne všechny současné strojní zařízení umožňují.



Obr. 20 Příklady konstrukčního řešení běžných vyfukovacích trnů [24]

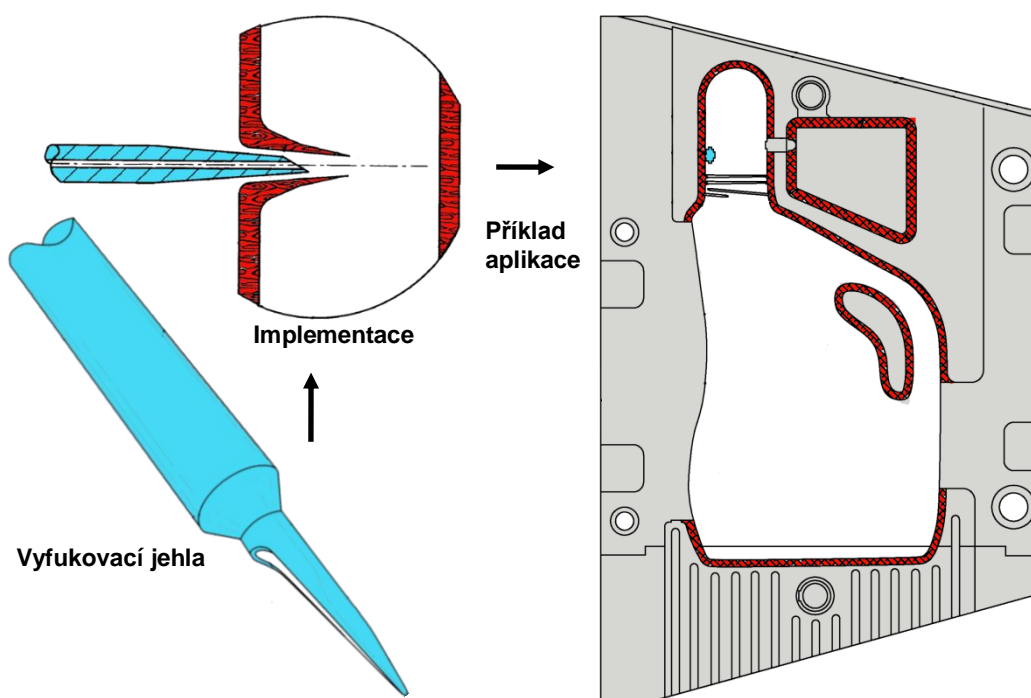


Obr. 21 Kalibrační trn umožňující kontinuální variantu interního chlazení tlakovým vzduchem [25]



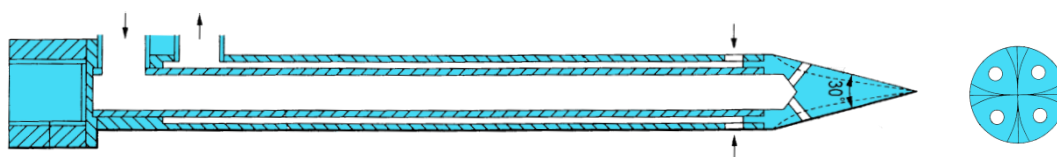
Obr. 22 Prodloužený kalibrační trn umožňující kontinuální variantu interního chlazení tlakovým vzduchem [26]

Další možností přívodu a odvodu tlakového média, která odstraňuje nutnost individuálního přístupu konstrukčního řešení kalibračního trnu, je použití vyfukovacích jehel. Jehly musí kromě optimální distribuce média zajistit také snadné proniknutí stěnou parizonu nacházejícího se v plastickém stavu. Pro snadné proniknutí je vhodné použít co nejmenší průměr jehly. Naproti tomu pro rychlý přívod a odvod média je naopak výhodnější použít průměr co největší [1]. Za limitní hranici je považován vnější průměr 8 mm. Použití větších průměrů, již značně komplikuje implementační fázi [1]. Příklad vhodného konstrukčního řešení vyfukovacích jehel je uveden v obrázku 23.

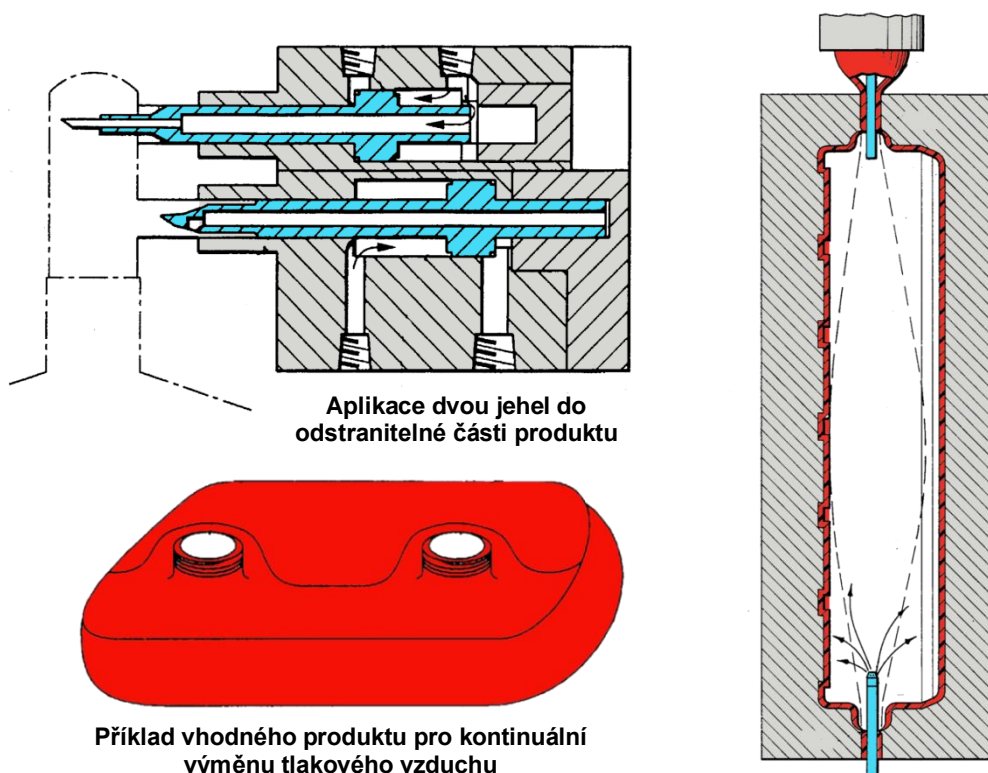


Obr. 23 Geometrie vyfukovací jehly uzpůsobená snadné implementaci [27], [28]

Výrobu dutých produktů je možné realizovat použitím jedné jehly, nejčastěji umístěné do později odstranitelné části výrobku, viz obrázek 23. Takovéto řešení umožňuje stejně jako konstrukční řešení běžného vyfukovacího trnu pouze cyklickou výměnu chladiva. Pro kontinuální variantu chlazení umožňující současný přívod a odvod plynného média je nutno využít nekonvenčních konstrukčních řešení. Příklad takového řešení představuje obrázek 24, kde je cirkulace zajištěna dvojitým opláštěním jehly. Další možnost zajištění cirkulace tlakového vzduchu, znázorněná v obrázku 24, spočívá v použití více jehel, nejčastěji dvou. Nespornou výhodou aplikace více jehel je variabilita rozmístění, která umožňuje dosažení efektivní cirkulace média i v problematických oblastech produktů. Rozmístění jehel však není libovolné, nýbrž je vymezeno geometrií produktu, rozmístěním otvorů. V souvislosti s aplikací vyfukovacích jehel je nutné upozornit na skutečnost, že standardní vyfukovací stroje neobsahují mechanismy a ovládací rozhraní přizpůsobené této variantě vyfukování a chlazení. Proto je zapotřebí počítat s investičními náklady. Proces výroby dutých výrobků se navíc z hlediska technologické náročnosti stává mnohem komplikovanější.



Obr. 24 Vyfukovací jehla umožňující kontinuální výměnu tlakového vzduchu [29]



Obr. 25 Kontinuální výměna tlakového vzduchu pomocí dvou jehel [30], [31]

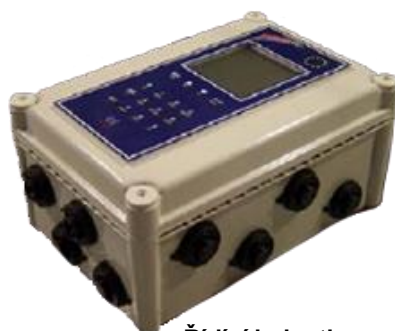
3.2.2 Podchlazený vzduch

Velikost tlaku, rychlost proudění a průtočné množství nejsou jediné parametry mající vliv na množství odebrané tepelné energie. Dalším parametrem, který významně ovlivňuje efektivitu interního chladicího procesu, je teplota plynného média. Skutečností je, že s nižší teplotou média bude dosaženo vyšších chladících efektivit [5]. Nicméně, ani mezi teplotou a časem chlazení neplatí lineární závislost. Například ve studii společnosti FASTI GmbH [6] je uvedeno, že snížení teploty tlakového vzduchu z 20 °C na 5 °C může přinést 10 % zvýšení produkce, ale pouze 15 % navýšení, je-li teplota dále snížena na -10 °C. Mezi nejvýznamnější pracovníky zabývající se touto problematikou doby minulé patřili Rainer Farrag a Herbert Mainer [5], [6], kteří v devadesátých letech dvacátého století založili společnost FASTI GmbH („Financial Advantage Secured Through Innovation“). Výsledkem jejich vědecko-výzkumné činnosti byla realizace chladicího systému CAC („Compressed Air System“) produkující vzduch o teplotách pohybujících se v rozmezí 20 °C až -45 °C. CAC chladicí systém, znázorněný na obrázku 26, se skládá z řídicí jednotky, vyfukovacího trnu či vyfukovací jehly, chladicí jednotky a ze standardizovaných prvků jako flexibilní rozvodové izolované hadice a solenoidové ventily. V současnosti se chlazením pomocí podchlazeného tlakového vzduchu zabývají především pracovníci společnosti BEKO Technologies [32] a FASTI GmbH [33].



Obr. 26 Implementovaný CAC chladicí systém společnosti FASTI GmbH [6]

Řídicí jednotka je součástí systému zajišťující časování, dávkování procesu chlazení a také komunikaci mezi vyfukovacím strojem a chladicí jednotkou. Pro realizaci procesu interního chlazení je nezbytné získat od vyfukovacího stroje iniciační signály o ukončení probíhajících dějů (konec fáze tvarování, odvětrávání, atd.). Většina, a to převážně starších vyfukovacích strojů, nejsou schopny tyto signály chladicím systémům poskytnout. V těchto případech je zapotřebí vytvoření nové vazby mezi strojem a externí řídicí jednotkou. Na obrázku 27 je uveden příklad řídicí jednotky společnosti FASTI GmbH, pomocí níž lze řídit dva chladicí procesy technologie vyfukování najednou [6]. Na obrázku 27 jsou rovněž zobrazeny prvky zajišťující realizaci nastaveného procesu interního chlazení (solenoidové ventily).



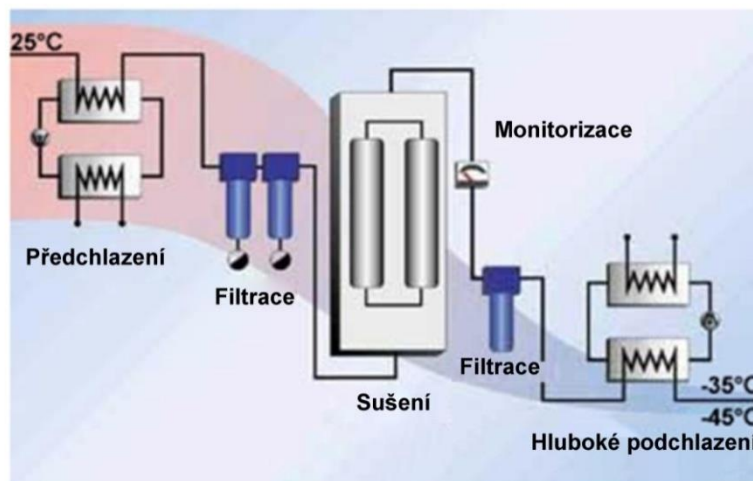
Řídicí jednotka



Solenoidové ventily

Obr. 27 Řídicí jednotka společnosti FASTI GmbH a prvky zajišťující přívod tlakového média [6]

Chladicí jednotka je součástí temperačního systému, která zajišťuje kontinuální dodávku stlačeného podchlazeného vzduchu. Obrázek 28 představuje způsob dosažení tohoto stavu média. Standardní průmyslový vzduch je několika-stupňově chlazen, filtrován, sušen a stlačován.



Obr. 28 Způsob získání hluboce podchlazeného média pro interní chlazení [6]

Společnosti FASTI GmbH a BEKO Technologies GmbH nabízejí dvě základní provedení chladicích jednotek (obr. 29), které se vzájemně liší technologickými parametry (nejnižší dosažitelnou teplotou). Jedná se o:

- BMB - „Blow molding Booster“ (min teplota 0 °C)
- BAC – „Blow molding Air Chiller“ (min teplota -45 °C)



Blow Molding Booster

Blow Molding Air Chiller

Obr. 29 Příklady provedení chladicích jednotek

BMB je chladicí jednotka produkující tlakový vzduch při minimální teplotě 0 °C a maximálním tlaku 1,4 MPa. Pro správnou funkci je nutno jednotku připojit k přívodu filtrované vody o teplotě nepřevyšující 20 °C. Uváděné dosažitelné zefektivnění produkce se pohybuje v rozmezí 15 až 35 % [32].

BAC je o něco výkonnější zařízení, které je schopno dodávat tlakový vzduch o minimálních teplotách až - 45 °C a tlacích 1,6 MPa (při připojení vody nepřevyšující 15°C). Pomocí této úrovně podchlazeného stlačeného vzduchu lze údajně získat navýšení produktivity 25 až 50 % [32].

Příklad vybrané skupiny jednotek, včetně limitujících procesních parametrů je uveden v tabulce 3.

Tab. 3 Parametry chladicích jednotek [32]

BAC	Max tok m ³ /h	Max. výstupní teplota [°C]	Max. tlak [MPa]	Spotřeba el. energie [kW]	Spotřeba chladicí vody [m ³ /h]
016-N2-25	16	-25	3,5	1,3	0,5
120-W1-35	145	-35	1,6	2,5	0,54
240-W2-35	290	-35	1,6	5,1	1,1
410-W2-35	495	-35	1,6	6,61	1,63
270-W2-45	338	-45	1,6	7,3	1,37
410-W2-45	513	-45	1,6	9,8	2,17
BMB					
LC 2	12	14	0,7	0,2	-
LC 40	240	10	1,2	1,5	-
LC 80	480	6	1,4	1,7	-
LC 120	720	3	1,4	1,7	-

Výše uvedené hodnoty navýšení produktivity výroby představují pouze informativní údaje poskytnuté producenty těchto zařízení. Konkrétní hodnoty navýšení produktivity vždy závisí na velikosti, typu produktu, vyfukovacím stroji, použitém chladicím zařízení a mnoha dalších faktorech. Pro lepší představu zde bude uvedeno několik aplikačních příkladů. Při použití BAC jednotky společnosti FASTI GmbH pro produkci 7,4 litrového (obr. 30), 590 gramů vážícího kontejneru technologií extruzního vyfukování z materiálu LDPE bylo, při procesních podmínkách představených v tabulce 4, evidováno zvýšení produktivity o 48,8 % [6]. Při produkci 9,5 litrového, 790 gramů vážícího kontejneru obdobného tvaru se jednalo zefektivnění výrobního procesu o 31,5 % [6]. Kromě zvýšení efektivity je dalším důležitým parametrem rozhodujícím o využití této technologie cenová kalkulace a návratnost investic. Pro výše uvedené výrobky byla stanovena návratnost, která v prvním případě činila 33 dní a v druhém 59 dní.



Obr. 30 Testovaný 7,4 litrový kontejner [6]

Tab. 4 Příklad zefektivnění výrobního procesu 7,5 l a 9,5 l kontejneru [5], [6]

7,5 l Kontejner	Klasický proces	Interní chlazení
Teplota polotovaru [°C]	195	199
Teplota vstupující vody do externího temp. systému [°C]	11,9	11,4
Teplota vystupující vody do externího temp. systému [°C]	12,7	12,5
Teplota tlakového vzduchu [°C]	20	-29
Odváděná teplota tlakového vzduchu [°C]		56
Vyfukovací tlak [MPa]	0,85	0,75
Průměrná spotřeba vzduchu [l/s]		18
Spotřeba vzduchu [l/s]		38 000
Čas chlazení [s]	44	24
Celkový čas cyklu [s]	61	41
Produkce za hodinu [-]	59	88
Zvýšení produkce [%]		48,8
Hodinová cena práce stroje [\$]	117,8	117,8
Náklady na pracovníka [\$]	51,8	51,8
Denní produkce [-]	24	24
Váha produktu [g]	590	540
Cena materiálu za kg [\$]	1,85	1,85
Cena materiálu produktu [\$]	1,09	1,00
Příkon externí chladicí jednotky [kW]		7
Cena práce externí chladicí jednotky/h [\$]		0,18
Spotřeba vzduchu [m ³ /h]		64,91
Cena tlakového vzduchu za h [\$]		1,95
Výrobní cena za h [\$]	234,02	260,75
Denní výrobní cena [\$]	5 617,00	6 258,00
Počet produktů za den [-]	1 416	2 107
Výrobní cena na produkt [\$]	3,97	2,97
Denní profit z externího chlazení [\$]		2 107,00
Investiční náklady [\$]		70 000,00
Návratnost (dny)		33
9,5 l Kontejner	Klasický proces	Interní chlazení
Teplota polotovaru [°C]	204	204
Teplota vstupující vody do externího temp. systému [°C]	14,8	14,5
Teplota vystupující vody do externího temp. systému [°C]	16,1	16
Teplota tlakového vzduchu [°C]	25	-29
Odváděná teplota tlakového vzduchu [°C]		43
Vyfukovací tlak [MPa]	0,85	0,75
Průměrná spotřeba vzduchu [l/s]		25
Spotřeba vzduchu [l/s]		53000
Čas chlazení [s]	58	38
Celkový čas cyklu [s]	83,5	63,5
Produkce za hodinu [-]	43	57
Zvýšení produkce [%]		31,5

Rovněž zařízení společnosti BEKO Technologies GmbH potvrzuje výrazné navýšení účinnosti chladicí fáze vyfukovacího procesu. Také v tomto případě je níže uvedeno několik aplikačních příkladů. Testované produkty jsou zobrazeny v obrázku 31. Při využití chladicího potenciálu BAC jednotky pro výrobu nádoby ostřikovače bylo dosaženo zkrácení výrobního procesu z 35 sekund na 23 sekund, což umožnilo 33 % zvýšení produktivity [34]. Při produkci vzduchového potrubí se jednalo o 23 % navýšení produkce, zkrácení výrobního taktu z 23 sekund na 17 sekund. U produktu palivové nádrže implementace chladicího systému umožnila zkrácení výrobního cyklu z 80 sekund na 56 sekund 23 % zvýšení produkce [34]. Pro výroby byla rovněž stanovena návratnost investičních nákladů. Nejrychlejší návratnost, 3,5 měsíce, byla zjištěna při výrobě palivové nádrže a naopak nejdelší, tedy 6,8 měsíců, u produkce vzduchového potrubí [34]. Způsob finanční kalkulace ani procesní parametry v publikovaných zdrojích bohužel nejsou uvedeny, a proto nelze tyto výsledky porovnávat s výsledky chladicích systémů společnosti FASTI GmbH.

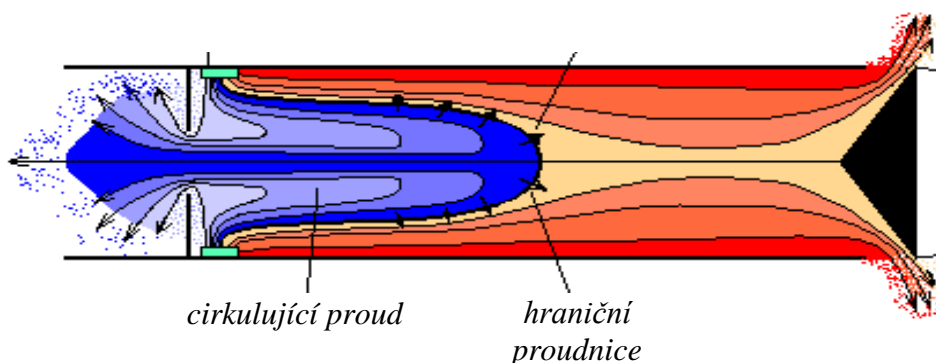


Obr. 31 Příklady testovaných produktů pro aplikaci BAC chladicího zařízení společnosti FASTI GmbH [34]

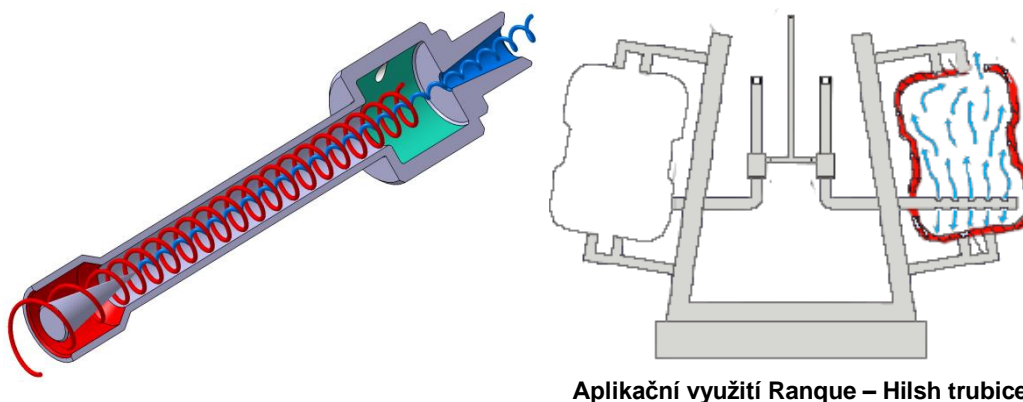
Další možností jak získat podchlazený vzduch o velmi nízkých teplotách (až -46°C) je použití nekonvenčního systému Ranque – Hilsh (vírové) trubice. Princip tohoto zařízení, znázorněný na obrázcích 32 a 33, spočívá v expanzi přiváděného tlakové vzduchu ve stacionárním generátoru. Expanze způsobí nárůst rychlosti proudu vzduchu (který nyní dosahuje až rychlosti zvuku) a následnou spirálovou rotaci, lokalizovanou vlivem odstředivých sil poblíž vnitřního okraje trubice. Plyn je od místa jeho vstupu směrem ke konci generátoru ohříván

disipací - třením (zvláště blízko stěny vírové trubice, kde je gradient rychlosti plynu největší) a zároveň separován na dva proudy - horký a studený. Studený proud plynu, separovaný z teplého proudu, je tlačěn zpět středem vírové trubice podél spirálových proudnic teplého proudu plynu. Stále rotující plyn se pohybuje menší rychlostí při konání jednoduché (přirozené) výměny tepla. Vnitřní, pomaleji se pohybující proud plynu, předává teplo vnějšímu, rychleji se pohybujícímu proudu plynu. Množství a teplota studeného nebo horkého vzduchu produkovaného vírovou trubicí je řízena ventilem na horkém výfuku plynu. Hodnoty teplot výstupních proudů plynu jsou vysoce závislé na tlaku přiváděného media [35]. Se snižujícím se tlakem vstupního media se snižuje i rozdíl teplot na obou výstupech. Například je-li použit průmyslový vzduch o tlaku 0,69 MPa, výstupem je maximální teplota -46 °C, respektive 127 °C, a je-li použit tlak 0,3 MPa, lze získat nejnižší teplotu pouze -31 °C [35].

vstup stlačeného vzduchu (20°C) místo přenosu energie



Obr. 32 Schéma proudového pole v protisměrné vírové trubicí [35]

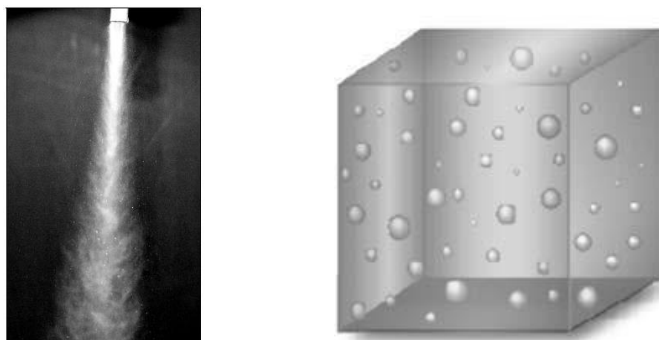


Aplikační využití Ranque – Hilsh trubice

Obr. 33 Princip separace proudů v Ranque – Hilsh trubicí společně s aplikačním příkladem využití trubic [35]

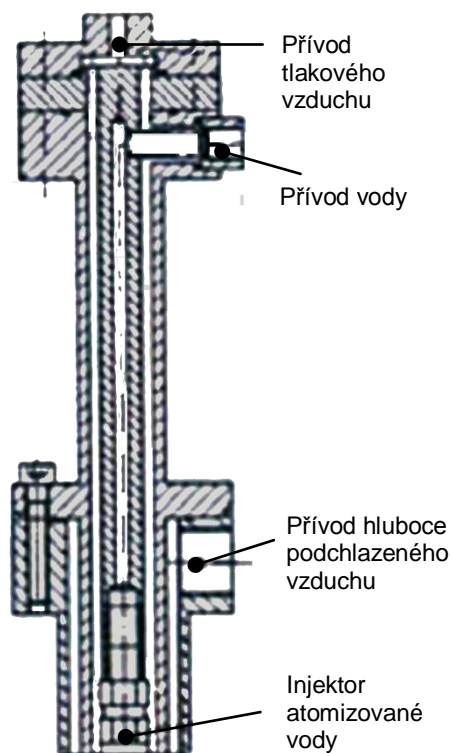
3.2.3 Atomizovaná voda

Jiného chladicího efektu využívají zařízení vstřikující atomizované kapky vody (obr. 34). Atomizované kapky vznikají cíleným mísením vody s tlakovým vzduchem, které je uskutečňováno ve speciálních mísících jednotkách. Výsledkem je vznik supersaturované směsi vstřikované injektážními jehlami do expandovaného prostoru výrobku [3]. Jakmile směs opustí jehlu, je kinetická energie získaná expanzí převedena na tepelnou energii a kapky vody ve směsi se přemění v ledové krystalky (Joule-Thomsonův efekt). Krystalky unášené v proudu adiabaticky expandujícího vzduchu dopadají na stěny produktu, kde odebírají tepelnou energii, jsou taveny. Z roztavených krystalků se stávají vodní kapky, které odebírají další část tepelné energie, až do okamžiku, kdy dojde k jejich bodu varu a odpaření. Jedná se tedy o třífázový proces odvodu tepelné energie, led-voda-plyn, což z něho dělá vysoce efektivní řešení.



Obr. 34 Injektáž atomizovaných kapek vody[36]

Proces interního chlazení atomizovanou vodou zvaný I.S.C („Internal Surface Cooling Systém“), byl vyvinut v druhé polovině dvacátého století společností Hunker Laboratories [5]. Obdobně jako při chladicí variantě využívající výměny tlakového vzduchu je i zde zapotřebí používat vhodně upravené vyfukovací trny. Nutnost přívodu dvou chladících médií (běžného tlakového vzduchu; chladicí směsi tlakového vzduchu s atomizovanými kapkami) však značně komplikuje jeho konstrukci. Příklad možného řešení je uveden na obrázku 35, kde je injektor zabudován do těla vyfukovacího trnu. Navržená konstrukce trnu umožňuje aplikaci i vysoce podchlazeného plynu. Výrobní proces využívající injektáže atomizované vody vypadá následovně. Nejprve je výrobek vyfouknut klasickým způsobem a teprve po dosažení dostatečné tvarové stability produktu je kontinuálně přiváděna chladicí směs. Pro eliminaci rizika zůstatku kapalně fáze ve vnitřních prostorách výrobku je v poslední fázi procesu prováděno dodatečné „profouknutí“ běžným průmyslovým tlakovým vzduchem [37].



Obr. 35 Trn umožňující aplikaci systému I.S.C i podchlazeného vzduchu [37]

Na výslednou chladicí účinnost I.S.C systému mají nejvýznamnější vliv parametry tlaku vody, rychlosti proudu a velikosti kapek, které jsou odvislé od použitého typu vstřikovacích jednotek – pneumatická, hydraulická, ultrasonická. Z výsledků experimentálních měření, kde jsou porovnávány účinnosti nastavení procesu chlazení vstřikovacích jednotek, lze konstatovat, že je z hlediska efektivity nejvýhodnější používat pneumatický systém při nastavení malé kapky a nejvyšší rychlosti proudu [36]. V tabulce 5 jsou porovnány dosažitelná zvýšení efektivity chlazení v závislosti na objemu, hmotnosti a použitém materiálu produktu. Z dosahovaných výsledků [38] je možné konstatovat, že aplikací I.S.C. chladicího systému se průměrné zvýšení produktivity výroby pohybuje kolem 40 %.

Tab. 5 Zefektivnění procesu chlazení systémem I.S.C [38]

Objem [l]	Váha [kg]	Čas chlazení Bez ISC [s]	Čas chlazení s ISC [s]	Snížení času chlazení [%]	Materiál	Produkce za hodinu ks/ h
22	1,8	58	24,0	58	LDPE	90
22	1,19	50	37,0	26	LDPE	60
4,5	0,15	15,5	10,0	35	HDPE	225
4,5	0,125	10,0	7,0	30	LDPE	1107
2,3	0,065	8,0	3,5	56	HDPE	2118
2,3	0,070	10,0	7,0	30	HDPE	1440
1,15	0,040	10,0	6,0	40	HDPE	1800
1,15	0,057	10,0	7,0	30	HDPE	1108

3.2.4 Oxid uhličitý

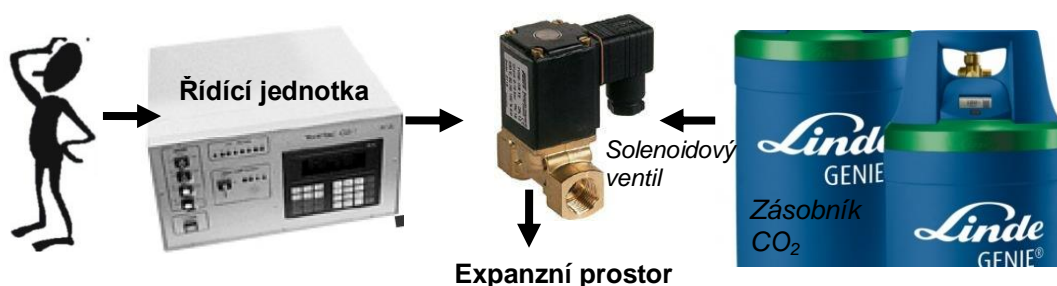
Oxid uhličitý (CO₂) je obecně chápán jako „škodlivina“, jejíž produkce by se měla co nejvíce omezit. V plynném stavu lze CO₂ charakterizovat jako nehořlavou bezbarvou látku bez zápachu, která má velký chladicí potenciál ve stavu kapalném a tuhém, viz tabulka 6. Jeho poměrně snadná extrakce a množství využitelných vlastností jsou důvodem neustálého nárůstu průmyslových aplikací. Nejčastějším způsobem získání oxidu uhličitého je chemická reakce, kde se CO₂ uvolňuje ve formě vedlejšího produktu. Další možností je využití přírodních ložisek (Německo, Francie, Maďarsko, Rusko) [39]. Získaný plynný oxid uhličitý je následně čištěn, stlačován do kapalného stavu, ve kterém je (bezpečně) skladován a distribuován prostřednictvím tlakových zásobníků (tlakové tanky, tlakové lahve).

Tab. 6 Fyzikálně-chemické vlastnosti CO₂ [40]

Molekulová hmotnost	44,01 [g.mol ⁻¹]
Teplota tání (při tlaku 0,5MPa)	-56,6 [°C]
Teplota varu (při tlaku 0,1MPa)	-78,5 [°C]
Vlastnosti CO ₂ – pevná fáze	
Hustota pevné fáze (-56,6°C; 0,52 MPa)	1512,4[kg.m ⁻³]
Hustota pevné fáze (-78,9°C; 0,1 MPa)	1564 [kg.m ⁻³]
Latentní teplo tání (-56,6°C; 0,52 MPa)	196104 [J.kg ⁻¹]
Latentní teplo sublimační (-56,6°C; 0,52 MPa)	543780[J.kg ⁻¹]
Latentní teplo sublimační (-78,9°C; 0,1 MPa)	573130[J.kg ⁻¹]
Vlastnosti CO ₂ – kapalná fáze	
Hustota kapaliny (-56,6°C; 0,52 MPa)	1178 [kg.m ⁻³]
Hustota kapaliny (-20°C; 1,97 MPa)	1030[kg.m ⁻³]
Hustota kapaliny (0°C; 3,4 MPa)	924,8 [kg.m ⁻³]
Hustota kapaliny (20°C; 5,7 MPa)	770,7 [kg.m ⁻³]
Teplota varu, sublimace (při 1,013 bar)	-78,5 [°C]
Latentní teplo vypařování(-56,6°C; 0,52 MPa)	348010 [J.kg ⁻¹]
Latentní teplo vypařování(20°C; 5,7MPa)	155330 [J.kg ⁻¹]
Tlak par (při 20°C)	58,5 bar
Vlastnosti CO ₂ – plynné fáze	
Hustota plynu (-56,6°C; 0,52 MPa)	13,84 [kg.m ⁻³]
Hustota plynu (-78,9°C; 0,1 MPa)	2,74 [kg.m ⁻³]
Hustota plynu (20°C; 5,7 MPa)	190,2 [kg.m ⁻³]
Faktor stlačitelnosti (1,013 bar; 15°C)	0,9942
Měrný objem (1,013 bar; 21°C)	0,547 [m ³ .kg ⁻¹]
Tepelná kapacita při konst. tlaku c _p (1,013bar; 25°C)	0,037 [kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
Tepelná kapacita při konst. objemu c _v (1,013 bar; 25°C)	0,028 [kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
Poměr tepelných kapacit, c _p / c _v (1,013 bar; 25 °C)	1,293759
Dynamická viskozita (1,013 bar; 0°C)	13,9.10 ⁻⁶ [Pa.s]
Tepelná vodivost (1,013 bar; 0°C)	0,01465 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]

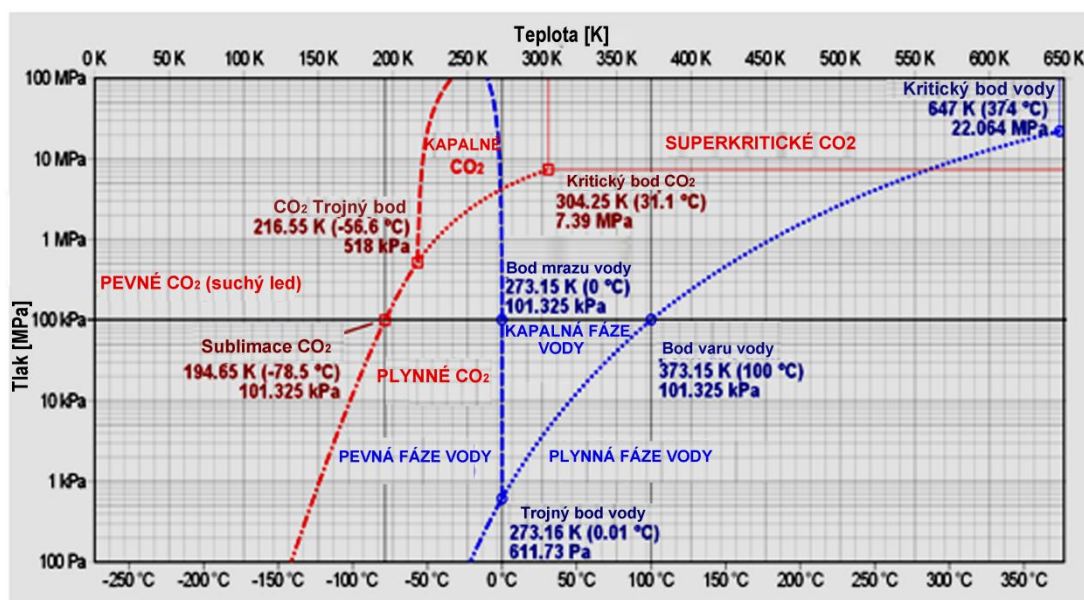
Nejrozšířenější praktické aplikace oxidu uhličitého na počátku 21. století spadají především pod farmaceutický a potravinářský průmysl [39], [41], ve kterém jsou využívány inertní vlastnosti CO₂ při mletí, míchání, balení, sycení a mnoha dalších zpracovatelských technikách. Technické aplikace jsou prozatím převážně chápány jako nekonvenční technologie a jejich prosazování na trhu je pozvolné a převážně vázané na nezbytnost nákupu nového strojního vybavení a periférií. Přesto je v současné technologické praxi možno nalézt několik ustálených aplikačních využití, jako například svařování v ochranné atmosféře (MAG), přesné laserové řezání ocelových i plastových desek umožněné aktivní CO₂ optickou atmosférou [39].

Ve zpracování polymerních materiálů jsou evidovány první příklady využití oxidu uhličitého již z poloviny 50. let minulého století, ale k intenzivnímu rozvoji využívání tohoto plynu došlo až o 20 let později a bylo spojeno s masivním rozmachem produkce plastových výrobků [42]. Jednalo se však především o technologie dnes známé jako injekční vstřikování s podporou plynu nebo kapaliny, GIT/ WIT nebo GAIM/ WAIM. S postupným zvyšováním nároků na kvalitu plastových dílů a jejich narůstající geometrickou složitostí se využití technických plynů, a to i v kapalně formě, rozšířilo i o aplikace zaměřené na intenzivní chlazení výrobních nástrojů. První, kdo patentoval technologii injektáže kapalného CO₂ za účelem chlazení vyfukovacího procesu, byl v roce 1962 Richard Gasmire, inženýr Duraglass výzkumného centra v Toledu [43]. Mezi další významné vědecké pracovníky, jež také zkoumali možnosti využití CO₂ chlazení pro produkci polymerních materiálů, patřili zejména profesor Leonard B. Ryder, prezident Ryder Associates [3], Denes B. Hunkar z Hunkar Laboratories Ohio [38] a Robert N. Bose [43]. V současnosti se chlazením využívajícím oxidu uhličitého a dusíku zabývají především firmy Linde Gas, a.s. [44] a Air Products, s.r.o. [45] a mezi nejvýznamnější vědecké pracovníky současnosti patří Andreas Praller, který vyvinul společně ve spolupráci s firmami Linde Gas, a.s. a Iserlohner Kunststoff Technologie GmbH v devadesátých letech dvacátého století zařízení vstřikující kapalným oxidem uhličitým pro technologii bodové chlazení zvanou „Spot-Cooling“ [46].



Obr. 36 Jednotlivé členy zařízení umožňující injektáž kapalného CO₂

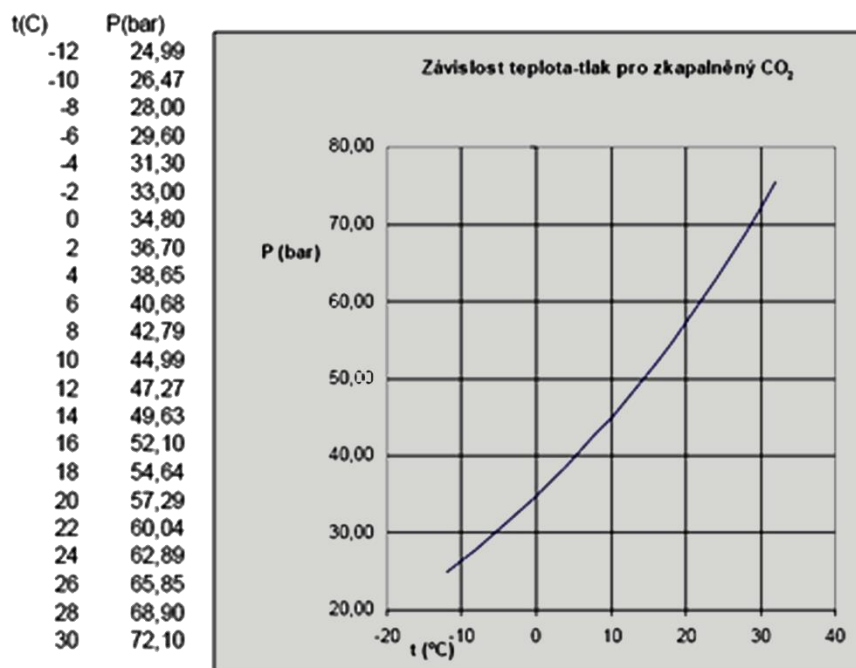
Zařízení Andrease Prallera se sestává z několika základních prvků znázorněných v obrázku 36, kterými jsou řídicí jednotka umožňující uživateli nastavení intervalu vstřikování, solenoidové ventily, zásobníky kapalného CO₂ a prvků zajišťujících přívod média do chlazených prostor – tlakových rozvodů, kapilár. Vzájemné propojení jednotlivých členů umožňuje injektáž oxidu uhličitého do chlazených oblastí. Zde vlivem adiabatického poklesu tlaku kapalněné CO₂ expanduje ve vymezeném prostoru. Kapalný oxid uhličitý může existovat jen za tlaku vyššího než je cca 0,5 MPa (pětinásobek atmosférického tlaku), viz fázový diagram obrázek 37. Kinetická energie získaná z expanze se přeměňuje na tepelnou energii. Výsledkem je vznik dvoufázové směsi tvořené atomizovanými krystaly a plynem [3]. Vzniklá směs je v okamžiku dotyku se stěnou polymeru tavena, k čemuž je zapotřebí energie odebíraná z produktu ve formě tepla [23].



Obr. 37 Porovnání fázových diagramů oxidu uhličitého a vody [47]

Jak již bylo předestřeno, kapalná fáze CO₂ může existovat pouze při určitých podmínkách teploty a tlaku (obrázek 37), pod kritickou teplotou 31 °C a nad trojným bodem (teplota -56,6 °C; tlak 0,5 MPa). Proto jsou za účelem přepravy a skladování oxidu uhličitého využívány tlakové nádoby. Dodávky větších objemů jsou nejčastěji realizovány pomocí izolovaných cisteren a tlakových tanků. Izolace od okolního prostředí umožňuje uchování kapalného stavu plynu při parametrech pohybujících se v rozmezí teplot -35 °C až -15 °C a tlacích 12 až 25 barů [40]. Pro dodávky menších objemů je častěji využíváno neizolovaných tlakových nádob, tlakových lahví, kde parametry kapalného CO₂ odpovídají tlakům 45 až 65 barů a teploty teplotám okolního prostředí [40]. Při využití zkapalněných plynů za účelem chlazení

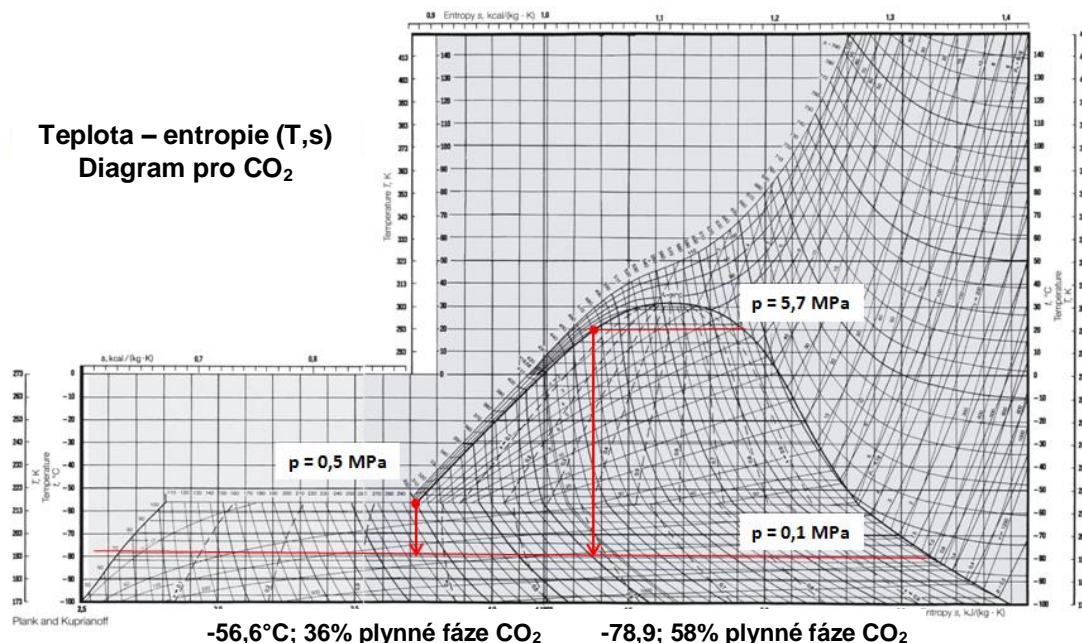
výrobního nástroje je důležité upozornit na skutečnost, že tlak v skladovací nádobě (tlakové lahvi) je závislý na teplotě média, nikoliv na množství (při dané teplotě je tlak v lahvi konstantní) [41]. Teprve po odpaření veškeré kapalné fáze, kdy už v lahvi zbývá malé množství produktu, začne tlak plynu klesat. Kontrola množství CO₂ v láhvi je proto možná pouze vážením. Závislost tlaku v lahvi na teplotě je zobrazena v obrázku 38.



Obr. 38 Závislost tlaku CO₂ v tlakové nádobě na teplotě [41]

V problematice přívodu a odvodu CO₂ chladicího média musí být rovněž zde brána v úvahu nutnost kombinace dvou rozdílných médií, běžného tlakového vzduchu a kapalného CO₂. Konstrukční úprava trnu však nemusí být tak zásadní jako v případě integrace injektážní jednotky technologie I.C.S., jelikož je pro přívod média s výhodou využívána tenká kapilára vedená přímo do expanzního místa (ústí vyfukovacího trnu či vyfukovací jehly) [23]. Z hlediska časového nastavení procesu chlazení je přívod CO₂ do vnitřních částí produktu nejčastěji volen stejně jako u variant chlazení I.C.S. a C.A.C. na konci vyfukovacího procesu. Výhodou CO₂ temperačního systému je variabilita způsobu dávkování, kde řídicí jednotka umožňuje nastavení jak přerušované, tak kontinuální možnosti injektáže.

Je-li za účelem zefektivnění interního chlazení vyfukovacího procesu využito injektáže kapalného oxidu uhličitého, dosahuje uváděné navýšení produktivity hodnot 40 až 80 % [3], [24], [43]. Pro aplikaci této nekonvenční chladicí metody je dále vhodné poznamenat, že pro vedení zkapalněného CO₂ platí obecné pravidlo dodržení co nejkratší vzdálenosti. Důvodem je snížení teplotních a tlakových ztrát, které mají významný vliv na utvářený poměr expandující směsi tvořené krystalky ledu a plynu. Poměr fází má totiž zásadní vliv na efektivitu chlazení, kde se zvyšujícím se množstvím pevné fáze roste i chladicí potenciál CO₂ [41]. Za předpokladu, že se jedná o adiabatický děj, lze množství plynné a pevné fáze stanovit z diagramu teplota – entropie ($T - s$), viz obrázek 39. Jel-li kapalný oxid uhličitý skladován v neizolované tlakové nádobě při teplotě 20 °C a tlaku 5,7 MPa, je výsledný poměr směsi expandujícího media (teplota -78,9 °C) roven 42 % pevné fáze a 58 % plynné fáze. Poměr fází, které vzniknou po expanzi, závisí na tlaku, resp. teplotě kapalné fáze v tlakové láhvi. Při teplotách a tlacích odpovídajících trojnému bodu vzroste množství tuhé fáze na 64 %, což je také maximální možný poměr, protože při nižší teplotě již tekutá fáze neexistuje.



Obr. 39 Stanovení procentuálního podílu pevné a plynné fáze při adiabatické expanzi CO₂ z $T - s$ diagramu oxidu uhličitého [40]

3.2.5 Dusík

Jiným zkapalněným plynem používaným v technické praxi za účelem chlazení, který v sobě ukrývá ještě vyšší chladicí potenciál než oxid uhličitý, je dusík. Kapalný dusík je bezbarvá kapalina s velmi nízkým bodem varu -195,8 °C, kritickou teplotou -146,9 °C a tlakem 3,39 MPa [50]. Při atmosférické expanzi nedochází k tvorbě dvoufázové směsi jako v případě CO₂. Dusík přechází přímo do plynného stavu. Jedná se tedy o dvoufázový chladicí proces, kde je využito latentního a specifického tepla.

Tab. 7 Fyzikálně - chemické vlastnosti dusíku [48]

Molekulová hmotnost	28,0134 [g.mol ⁻¹]
Teplota tání (při tlaku 0,1 MPa)	-210,01 [°C]
Teplota varu (při tlaku 0,1 MPa)	-195,80 [°C]
Vlastnosti dusíku – pevná fáze	
Teplota tání (při tlaku 0,1 MPa)	-210,01 [°C]
Latentní teplo tání (bod tání; 0,1 MPa)	25 702 [J.kg ⁻¹]
Vlastnosti dusíku – kapalná fáze	
Hustota kapaliny (bod varu; 0,1 MPa)	806,11 [kg.m ⁻³]
Teplota varu, sublimace (při 101,3 kPa)	-195,8 [°C]
Latentní teplo vypařování (bod varu; 0,1 MPa)	199 810 [J.kg ⁻¹]
Tlak nasycené páry (při 46 K)	100 [Pa]
Střední tepelná kapacita (při 0,1 MPa)	2 042 [J.kg ⁻¹ .K]
Vlastnosti dusíku – plynné fáze	
Hustota plynu (teplota varu; 0,1 MPa)	4,61 [kg.m ⁻³]
Hustota plynu (15°C; 0,1 MPa)	1,18 [kg.m ⁻³]
Faktor stlačitelnosti (15°C; 0,1 MPa)	0,99971
Měrný objem (25°C; 0,1 MPa)	0,873 [m ³ .kg ⁻¹]
Tepelná kapacita při konst. tlaku c _p (25°C ; 0,1 MPa)	0,0292 [kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
Tepelná kapacita při konst. objemu C _v (25°C ; 0,1 MPa)	0,0208 [kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
Poměr tepelných kapacit, c _p /c _v (25°C ; 0,1 MPa)	1,401
Střední tepelná kapacita (při 0,1 MPa)	1040 [kJ.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Tepelná vodivost (0°C ; 0,1 MPa)	0,024 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Dynamická viskozita (0°C ; 0,1 MPa)	1,663.10 ⁻⁶ [Pa.s]

Využití dusíku je v současnosti známo především z technologie obrábění, kde dusík zajišťuje progresivní chlazení výrobních nástrojů i obrobků. V oblasti zpracování polymerních materiálů doposud není evidováno mnoho aplikačních příkladů využití chladicího potenciálu tohoto média. Mezi vědecko-výzkumné pracovníky, kteří se věnovali internímu chlazení pomocí dusíku, patří například M.L. Gibbse [51] a D.E. Connora III [50]. Oba autoři prokázali ve svých studiích

výrazné navýšení efektivity při aplikaci interního chlazení injektáží kapalného dusíku. V prvním případě bylo evidováno 45 % navýšení produktivity 75 litrové, 8 kg vážící nádrže a v druhém 34 % navýšení produkce 4 litrové, 100 gramů vážící lahve. Další z autorů, který se věnoval problematice interního chlazení dusíkem byl M.A. Garbett [51]. Mr. Garbett vyvinul počátkem devadesátých let pro společnost Airco Gases zařízení „Cool – KwikTM system“. Tento chladicí systém se skládá z izolovaného zásobníku, vakuového rozváděcího systému („Multi – Flow system“) přivádějícího dusík ze zásobníku do chlazeného nástroje, odvětrávacích (odváděcích) kanálů a modifikovaných vyfukovacích trnů. Představený rozváděcí systém umožňuje díky řídicí jednotce, elektromagnetickým solenoidovým ventilům, aktivní a pasivní regulaci tlakovým regulátorem a polohovatelnými vstupními členy soustavy vysokou přesnost dávkování. Mr. Garbett představený chladicí systém testoval na skupině produktů s výsledky navýšení produktivity výroby uvedenými v tabulce 8.

Tab. 8 Příklady navýšení produktivity výroby při aplikaci „Cool – KwikTM systému“ [51]

Palivová nádrž	Tělo filtru	200l Sud	20l Kontejner
34 %	38 %	50 %	40 %
15l Kontejner	2l Kontejner	2l Kontejner	0,25l Lahev
46 %	28 %	38 %	40 %

Kromě zřejmých výhod aplikace představeného interního systému spojených se zvýšením produktivity výroby je vhodné upozornit i na některé nevýhody. Mezi nejčastější publikované nevýhody patří zamrzání pohyblivých členů vyfukovacího systému [1]. Tento problém je často řešen expanzí kapaliny mimo interní chladicí soustavu, nicméně za cenu poklesu účinnosti interního chlazení [1]. Další závažné riziko spojené s injektáží dusíku spočívá v předimenzování chladicího systému, nedostatečné expanzi, nebezpečí hromadění zkapalněného dusíku ve spodních částech produktu. Hromadění dusíku ve spodních částech produktu následně způsobuje, vlivem intenzivnějšího odvodu tepelné energie, zvýšení vnitřního pnutí a eventuálně i následnou deformaci výrobku [4]. Otázka zdravotní bezpečnosti také nesmí být opomenuta. V případě, že koncentrace dusíku v ovzduší dosáhne určitého procentuálního poměru, vzduch se stane nedýchatelným. Při práci s dusíkem v uzavřených prostorách je tedy nutno zabezpečit ventilaci nebo odsávání, které vyloučí pokles kyslíku pod hranici 16 % [48].

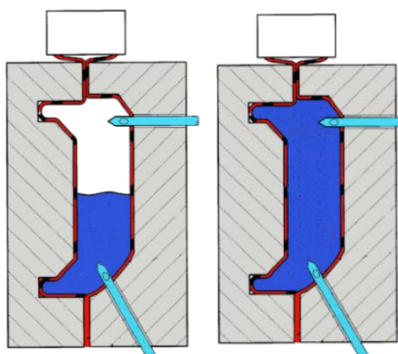
3.2.6 Srovnání interních chladicích systémů

Jsou-li porovnány jednotlivé varianty zvýšení účinnosti chlazení interního vyfukovacího systému, je zřejmé, že nejnižší tepelné redukce bude dosaženo při výměně konvenčního tlakového vzduchu o teplotě okolí [1]. Chceme-li docílit vyššího chladicího efektu, je nutné použít vzduch o nízké teplotě, čili hluboce podchlazený vzduch. Ještě vyšší chladicí efekt je možné získat připojením systému vstřikující směs tlakového vzduchu s atomizovanými kapkami vody. Nicméně bezpochyby nejvyšší chladicí potenciál v sobě skrývá technologie injektáže zkapalněných plynů jako oxid uhličitý (-78 °C) a dusík (-198 °C) [6], [23]. Důkaz tohoto tvrzení je předložen ve studii Leonarda B. Rydera [3], který ve své práci provedl porovnání chladicího efektu výše představených systémů na 55 gramovém HDPE kontejneru cylindrického tvaru, produkovaném v šestinásobné formě technologií injekčního vstřikování. Jak již bylo predikováno, nejnižší efektivita chlazení (15 % zkrácení výrobního taktu) byla naměřena při cirkulaci vzduchu o standardních vyfukovacích parametrech. Technika využívající hluboce podchlazený vzduch umožnila zkrácení výrobního taktu o 22 % a aplikace směsi tlakového vzduchu s atomizovanými kapkami vody dokonce 26 % zkrácení. Nejvyšší účinnost, pak dle předpokladů byla zjištěna při vstřikování kapalného CO₂, kde navýšení výrobní produkce činilo 33 %. [3].

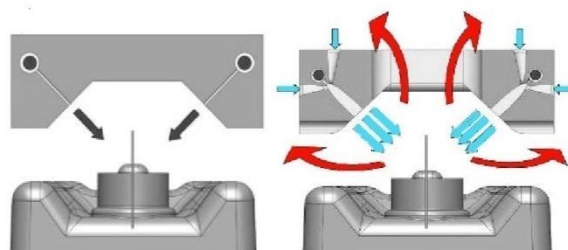
Efektivita chlazení je jistě pro producenty polymerních výrobků nesmírně důležitý parametr, nicméně ještě důležitější parametr je finanční stránka věci. Z doposud publikovaných výsledků [3], [5], [36] je možné konstatovat, že volba interního chladicího systému významně závisí na individuálních obchodních podmínkách společnosti. Například v případě, že firma není limitovaná odbytem a může pro výrobu použít více plně vytížených strojů (produkce 24 hodin/ den), bude tou správnou volbou vstřikování kapalného CO₂. Naopak vlastní-li společnost pouze pár, a navíc plně nevyužitých, strojů, bude pro ni nejvhodnější aplikace technologie cirkulace konvenčního vzduchu, která má z uvedených způsobů interního chlazení nejnižší investiční nároky [3]. Další důležitý faktor je produkt samotný. To proto, že jeho objem, tvar a zvláště tloušťka stěny mají enormní vliv na aplikovatelnost interních systémů. Z doposud publikovaných výsledků lze obecně [3], [5] vyvodit závěr, že využití interních chladicích systémů je obzvláště výhodné především pro velké tlustostěnné produkty.

3.3 Další způsoby zvýšení efektivity chlazení vyfukovacího procesu

Kromě uvedených nejznámějších způsobů interního chlazení vyfukovacího procesu existují ještě další mnohem méně ověřené možnosti odvodu tepelné energie. Mezi ně patří například injektáž kapek vody, známá pod názvem „Jet-Cool systém“ [52]. Jinou, vzhledem k vysokému součiniteli přestupu tepla, zajisté velmi efektivní chladicí variantou je proplach dutin výrobku vodou, obrázek 42. S použitím této chladicí metody je však spojena značná technologická náročnost, procesní rizika (únik vody) a také nutnost dodatečného sušení vnitřních částí produktu [53].



Obr. 42 Interní chlazení vodou [53]



Obr. 43 Bariérová ochrana formy [54]

Z dalších možností optimalizace procesu chlazení je vhodné představit tzv. bariérovou ochranu. Jak již bylo poznamenáno, jedním z nejjednodušších a zároveň nejefektivnějších způsobů navýšení efektivity chlazení vyfukovacího procesu je snížení teploty cirkulujícího média (vody) proudícího v temperačních kanálech vyfukovací formy. Teplota cirkulujícího média však nesmí klesnout pod teplotu rosného bodu výrobního prostředí, což by způsobilo rosení forem a tvorbu vad. Aplikace chladicího média o nižších parametrech (teplotách) je možná jen v případě izolace výrobního procesu od okolního prostředí, jejíž provedení je však mnohdy obtížné a nákladné. Proto je velmi zajímavou variantou vytvoření izolující bariéry. Bariéry, jež je zaměřena pouze na vyfukovací formu či dutinu výrobku [54]. Obrázek 43 ukazuje příklad konstrukčního řešení bariérové ochrany realizované prouděním suchého podchlazeného vzduchu o teplotě rosného bodu – 40 °C, což umožňuje i aplikace chladicího média s teplotou pod 0 °C [54]. Pro použití vody za tímto účelem je zapotřebí přidání složek na bázi etylen glykolu. Přičemž platí, že s rostoucím poměrem glykolu ve vodě roste i možnost podchlazení. Na druhou stranu se zvyšujícím se podílem glykolu ve vodě dochází také ke změně viskozity chladicího média evokující změnu tokových vlastností. Z těchto důvodů je v technické praxi doporučeno nepoužívat poměry vyšší jak 50/ 50. Nečastěji používané poměry vody a etylen glykolu jsou: voda 5 °C a 10 % glykolu o teplotě -4 °C či 20 % glykolu s teplotou -9,4 °C [1].

4 MATEMATICKÝ POPIS

Matematický popis je nezbytnou součástí optimalizačních procesů. Pomocí definovaných závislostí lze snadno určit váhu jednotlivých činitelů a nalézt optimální procesní nastavení. Dílčím cílem této práce je proto stanovit matematický popis probíhajících dějů tepelné výměny ve vyfukovacím procesu, tedy tepelnou bilanci, a to jak pro konvenční způsob interního chlazení, tak pro proces využívající fázové přeměny kapalného oxidu uhličitého. Jelikož se jedná o velice složitou problematiku, je nutno vycházet z některých předpokladů a zjednodušení:

- teplota parizonu, preformy je ve všech místech stejná
- vyfukovací forma tvoří uzavřený systém v tepelné rovnováze
- tepelné toky ve formě a teploty jednotlivých částí formy jsou časově i prostorově konstantní
- uvažuje se jednorozměrný případ sdílení tepla (ve směru normály k teplosměnnému povrchu)
- tepelný tok přiváděný do formy se považuje za kladný, tepelný tok odváděný z formy za záporný
- kolísání teploty povrchu dutiny formy během vyfukovacího cyklu se zanedbává
- za teplotu povrchu dutiny formy se považuje ustálená střední hodnota jejího teplotního maxima a minima
- za teplotu temperačního média cirkulujícího ve vyfukovací formě se považuje střední hodnota ze vstupních a výstupních hodnot
- teplota temperačního média interního systému je konstantní
- hodnoty reologických a tepelných charakteristik všech materiálů se berou jako střední v daném teplotním rozsahu
- přechodové odpory mezi jednotlivými částmi formy jsou zanedbány

Tepelná bilance vyfukovacího procesu (1) je sestavena z tepelných toků do procesu vstupujících a zároveň tepelných toků z procesu vystupujících (obrázek 44). Vstupující tepelný tok je vymezen tepelnou energií extrudovaného parizonu, respektive zahřáté preformy, vystupujícího tepelný tok efektivitou odvodu tepelné energie externího a interního temperačního systému. Do celkové tepelné bilance nesmí být opomenuto započítání tepla předaného vyfukovací formou do okolí.

$$\dot{Q}_{pr} - \dot{Q}_{TM} - \dot{Q}_{BL} - \dot{Q}_O = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{pr} - \dot{Q}_{TM} - \dot{Q}_{BL} - \dot{Q}_K - \dot{Q}_{Str} - \dot{Q}_L = 0 \quad (2)$$

Kde:

\dot{Q}_{Pr} – vstupující tepelný tok od zahřátého polotovaru (parizon, preforma) [W]

\dot{Q}_{TM} – tepelný tok odebraný temperačním médiem [W]

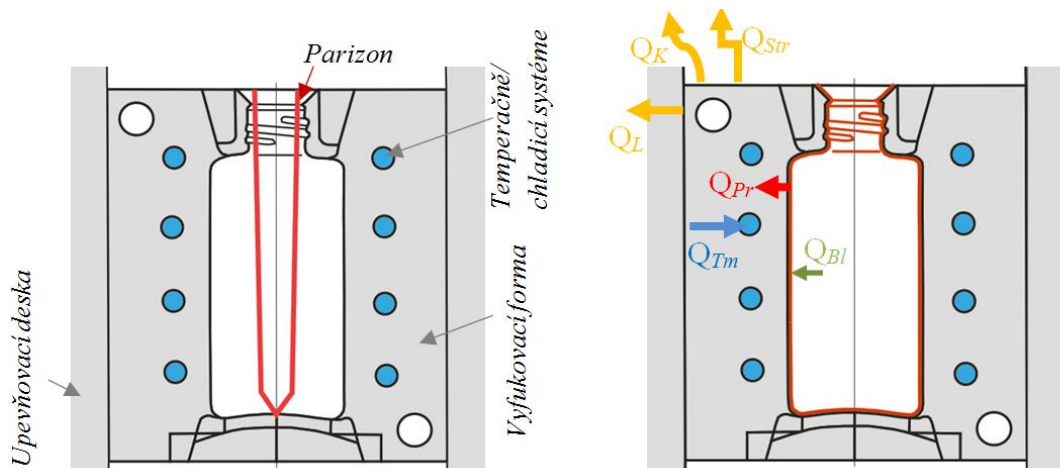
\dot{Q}_{BL} – tepelný tok odebraný plynným médiem [W]

\dot{Q}_O – tepelný tok předaný do okolí [W]

\dot{Q}_K – tepelný tok předaný do okolí prouděním (konvekce) [W]

\dot{Q}_{Str} – tepelný tok předaný do okolí sáláním (radiace) [W]

\dot{Q}_L – tepelný tok předaný do okolí vedením (kondukce) [W]



Obr. 44 Tepelná bilance vyfukovacího procesu

4.1 Externí temperačně chladicí systém

Temperace vyfukovacích forem je fyzikální proces, kde musí být uvažován jak přestup tepla z polymeru do jednotlivých částí formy (vedení), tak přestup tepla z formy do cirkulujícího teplotnosného media temperačního systému (proudění) a také přestup tepla z formy do okolí (vedením, prouděním a sáláním).

4.1.1 Tepelná výměna s okolím

Stanovení tepelné výměny mezi vyfukovací formou a okolím je velice obtížně měřitelné. Matematicky lze proces popsat následovně.

Komponenta proudění může být vymezena Newtonovým zákonem tepelné výměny:

$$\dot{Q}_K = A_S \cdot \alpha_L \cdot \int_{T_O}^{T_{PF}} dT \quad (3)$$

Kde :

A_S – plocha přicházející do kontaktu s okolním prostředím (stěny formy) [m²]

α_L – součinitel přestupu tepla pro přirozenou kovekci vzduchu (5 W/m² · °C)

T_{PF} – teplota povrchu formy [°C]

T_O – okolní teplota [°C]

Během procesu odformování dochází k otevření formy a vyjmutí výrobku. Pro správné stanovení přestupu tepla mezi formou a okolím musí být tento časový okamžik zahrnut do výpočtu:

$$\dot{Q}_K = \alpha_L (T_{PF} - T_O) \cdot \left(A_S + A_O \frac{t_{OT}}{t_c} \right) \quad (4)$$

Kde:

A_O – vnitřní plocha formy (v dělicí rovině) přicházející do kontaktu s okolním prostředím při odformování produktu [m²]

t_c – čas cyklu [s]

t_{OT} – čas odformování produktu [s]

Komponenta radiace může být stanovena Stefan – Boltzmannovým zákonem:

$$\dot{Q}_{Str} = A_S \cdot \varepsilon \cdot C_s \left[\left(\frac{T_{PF}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_O}{100} \right)^4 \right] \quad (5)$$

Kde:

ε – emisivita (pro vyleštěný ocelový povrch 0,25; pro formu v provozu 0,8) [-]

C_s – koeficient radiace absolutně černého tělesa [W/m² K⁴]

Vedení tepla neboli kondukce mezi dvěma tělesy je definováno vztahem:

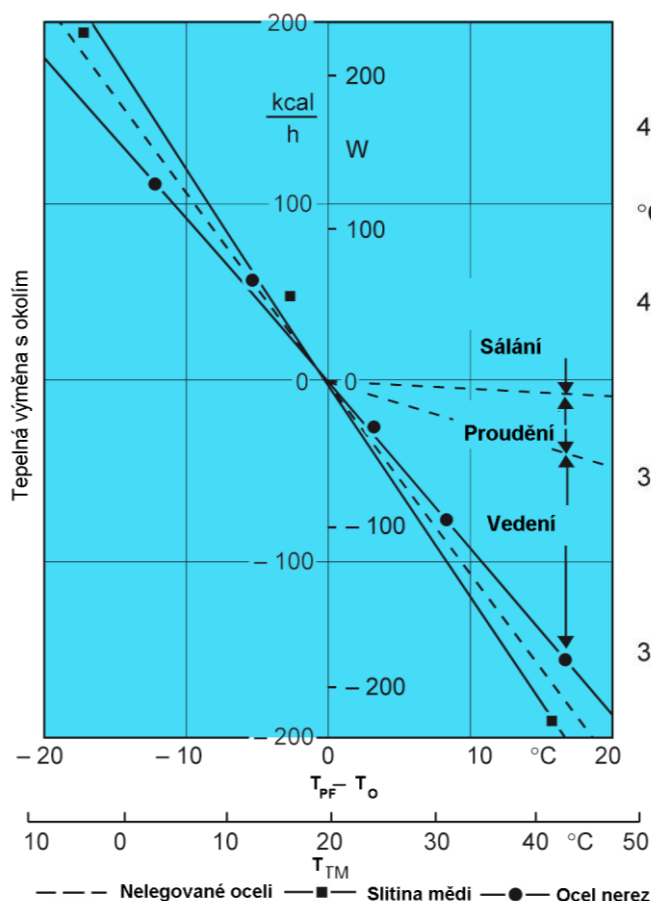
$$\dot{Q}_L = A_k \cdot \beta \cdot \int_{T_O}^{T_{PF}} dT \quad (6)$$

Kde:

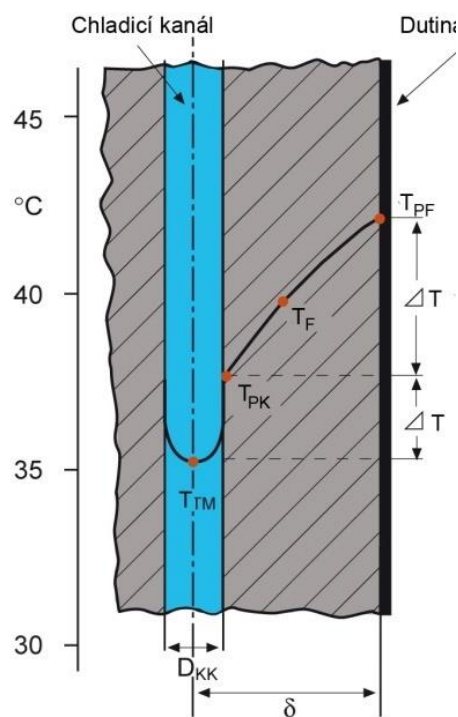
A_k – kontaktní plochy mezi oběma částmi formy a upínacími deskami [m²]

β – koeficient přestupu tepla (nelegovaná ocel-ocel = 98 ; vysoce-legovaná ocel-ocel = 84; měd-měd = 116) [W/ m² grad / °C]

Pro objasnění míry vlivu jednotlivých činitelů byla provedena četná experimentální měření [11], jejichž výsledky jsou zobrazeny v obrázku 45. Ze znázorněných závislostí je evidentní, že se zvyšující se diferencí mezi teplotou povrchu formy a okolím se množství tepelné energie odváděné do okolí zvyšuje a také že největší část předávané energie je zajištěna kondukcí (vedením).



Obr. 45 Tepelná výměna mezi formou a okolím [11]



Obr. 46 Teplotní profil mezi kavitou povrchu formy a temperačně chladícím kanálem [11]

4.1.2 Tepelná výměna mezi cirkulujícím médiem a dutinou formy

Z hlediska efektivity chlazení vyfukovacího procesu je bezpochyby nejdůležitějším prvkem kvalita přestupu tepla mezi polymerním materiálem a temperačním systémem. Tepelná energie, která je z produktu odváděna externím temperačním systémem, je vymezena tepelným tokem mezi polymerem a stěnou formy, a dále tepelným tokem mezi cirkulujícím médiem a formou (obrázek 46).

Tepelný tok mezi polymerem a stěnou formy je tepelný tok způsobený vedením a lze ho stanovit dle následujícího vztahu:

$$\dot{Q}_{TMV} = \frac{A_F \cdot \lambda_F}{\delta} \cdot \int_{T_{PK}}^{T_{PF}} dT \quad (7)$$

Kde:

A_F – povrch dutiny formy [m²]

T_{PK} – teplota povrchu temperačního kanálu [°C]

λ_F – součinitel tepelné vodivosti formy [W/ m².K¹]

δ – vzdálenost dutiny formy od povrchu temperačního kanálu [m]

Tepelný tok mezi cirkulujícím médiem a povrchem temperačního kanálu je definovaný prouděním:

$$\dot{Q}_{TM} = \alpha_{TM} \cdot A_K \cdot \int_{T_{TM}}^{T_{PK}} dT \quad (8)$$

$$\alpha_{TM} = \frac{N_U \cdot \lambda_{TM}}{D_K} \quad (9)$$

$$N_U = 0,037 \cdot (Re^{0,75} - 180) \cdot Pr^{0,42} \cdot \left(1 + \left[\frac{D_K}{L_{TK}}\right]^{0,67}\right) \quad (10)$$

$$Re = \frac{D_K \cdot v_{TM}}{\nu_{TM}} = \frac{D_K \cdot v_{TM} \cdot \rho_{TM}}{\eta_{TM}} \quad (11)$$

$$Pr = \frac{\nu_{TM}}{a_{TM}} \quad (12)$$

$$a_{TM} = \frac{\lambda_{TM}}{c_{TM} \cdot \rho_{TM}} \quad (13)$$

Kde:

A_{TK} – povrch temperačního kanálu [m²]

T_{TM} – teplota cirkulujícího média [°C]

α_{TM} – součinitel přestupu tepla [W/m².°C]

N_U – Nusseltovo číslo

λ_{TM} – součinitel tepelné vodivosti [W/ m².K¹]

D_K – charakteristický rozměr - průměr kanálu [m]

Pr – Prandtlovo číslo

Re – Reynoldsovo číslo

v_{TM} – rychlost proudění kapaliny [m/s]

ν_{TM} – kinetická viskozita kapaliny [m²/s]

ρ_{TM} – hustota kapaliny [kg/ m³]

c_{TM} – měrná tepelná kapacita cirkulující kapaliny při stálém tlaku [J/ kg.K]

a_{TM} – tepelná vodivost [kg/ m².s]

4.2 Interní chladicí systém

Je-li pro interní chlazení využito plynné médium, je možné stanovit tepelný tok vzniklý mezi vnitřním povrchem produktu a médiem dle rovnice:

$$\dot{Q}_{BL} = \alpha_p \cdot A_v \cdot \int_{T_{PL}}^{T_{VP}} dT \quad (14)$$

Kde:

A_v – vnitřní povrch dutiny výrobku [m²]

T_{VP} – teplota vnitřního povrchu produktu [°C]

T_{PL} – teplota plynného média [°C]

α_{BL} – součinitel přestupu tepla plynného média [W/m².°C]

- Součinitel přestupu tepla stacionárního vzduchu při teplotě 20 °C je 5 W/m².°C
- Součinitel přestupu tepla cirkulujícího vzduchu při teplotě 20 °C je 50 W/m².°C
- Součinitel přestupu tepla cirkulujícího vzduchu při teplotě -20 °C je 250 W/m².°C

Hodnoty součinitele přestupu tepla pro systémy využívající chladicího potenciálu kapalného oxidu uhličitého nejsou ze současných publikovaných prací známy. Jedná se totiž o velmi obtížně stanovitelnou veličinu, závisící na mnoha faktorech (iniciační teplotě, materiálu a tvaru produktu, procesním nastavení injektáže média, efektivitě přestupu tepla, poměru plynné a pevné fáze směsi CO₂, atd.). Teoreticky lze její hodnotu stanovit dle následujícího výpočtu:

$$Q_{CO_2} = \alpha_{CO_2} \cdot A_v \cdot \int_{T_{PL}}^{T_{VP}} dT \cdot \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (15)$$

$$\alpha_{CO_2} = \frac{Q_{CO_2}}{A_v \cdot (T_{VF} - T_{PL}) \cdot t} \quad (16)$$

Kde:

α_{CO_2} – součinitel přestupu tepla expandujícího kapalného CO₂ [W/m².°C]

Q_{CO_2} – odebraná tepelné energie [J]

t – čas injektáže CO₂ [J]

Velikost odebrané tepelné energie ochlazovanému tělesu účinkem injektáže 1 gramu tekutého CO₂ lze na základě podkladů stanovených z T - s diagramu a z tabelovaných hodnot vypočítat dle vztahu:

$$Q_{CO_2} = m \cdot \left(L_{PR} + \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \right) \quad (17)$$

Kde:

m – hmotnost média [kg]

L_{PR} – latentní teplo fázové přeměny [J.kg⁻¹]

T_1 – počáteční teplota [°C]

T_2 – konečná teplota [°C]

c_p – tepelná kapacita média při konstantním tlaku [J.kg⁻¹.K⁻¹]

Za již uvedených předpokladů (adiabatická expanze při 20 °C a atmosférickém tlaku, kap. 3.2.4) vzniká z odebraného množství 1 gramu tekutého CO₂ 58 % plynné fáze a 42% pevné fáze (suchý led) o teplotě -78,9 °C. Ochlazovací schopnost 1 g tekutého CO₂ odebraného z tlakové lahve za uvedených podmínek lze vypočítat následujícím postupem:

Množství tepla [J], které se odebere sublimací 0,42 g suchého ledu, je při teplotě -78 °C a tlaku 0,1 MPa dáno:

$$Q_{sub} = m_{CO_2} \cdot L_{SUB} = 0,42 \cdot \frac{571 \cdot 130}{1000} = 240,7 \text{ [J]} \quad (18)$$

Množství tepla, které se odebere při ohřevu 0,58 g plynné fáze a při expanzi 0,42 g plynné fáze vzniklé sublimací z teploty -78,9 °C (celkem znovu 1 g) na konečnou uvažovanou teplotu $T_2 = 20$ °C, je vyjádřeno vztahem (měrná tepelná kapacita c_p při 20 °C = 845 J.kg⁻¹.K⁻¹):

$$Q_{PLYN} = m_{CO_2} \cdot \bar{c}_p (T_2 - T_1) = 1 \cdot \frac{845}{1000} \cdot (20 - 78,9) = 83,6 \text{ [J]} \quad (19)$$

Celkový teoretický ochlazovací potenciál 1 g tekutého CO₂ odebraného z tlakové lahve při 20 °C a uvažovaném ohřevu plynných produktů na 20 °C je dán vztahem.

$$Q_{CO_2} = Q_{SUB} + Q_{PLYN} = 240,7 + 83,6 = 324,3 \text{ [J]} \quad (20)$$

4.3 Tuhnutí polymeru

Tuhnutí roztaveného polymeru může být v případě, že je tloušťka produktu výrazně menší než jeho délka vyjádřeno Fourierovým zákonem:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (21)$$

Kde

ρ – hustota polymeru [kg/ m³]

c_p – tepelná kapacita polymeru [J.kg⁻¹.K⁻¹]

k – tepelné vodivosti polymeru [W/ m².K⁻¹]

x – lokace v tloušťce stěny produktu [m]

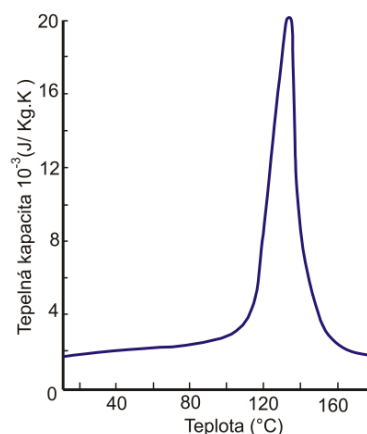
Hodnota tepelné kapacity je fyzikální veličina velmi závislá na teplotě a do značné míry je vymezena hodnotou entalpie (22). Pro teplotní systémy bez fázových změn, lze při určitém zjednodušení považovat hodnotu tepelné kapacity za teplotně nezávislou (konstantní). Nicméně v případě, že dochází během procesu chlazení k fázové přeměně, jako např. solidifikace polymeru, je tepelná kapacita vysoce teplotně závislá veličina, zejména v oblasti fázové přeměny, viz obr. 47.

$$c_p(T) = \frac{dH}{dT} \quad (22)$$

Kde:

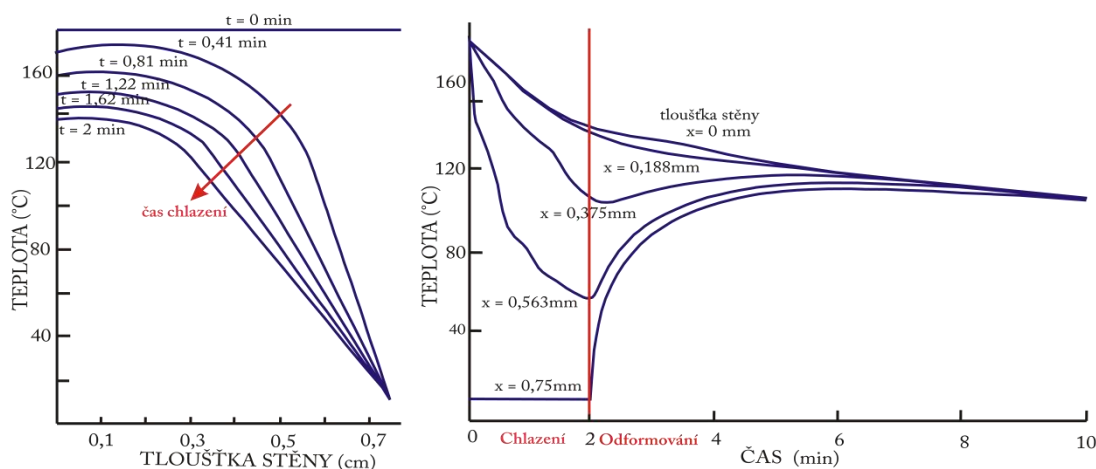
H – entalpie [kJ]

T – teplota polymeru [°C];



Obr. 47 Průběh tepelné kapacity HDPE při tuhnutí polymeru [22]

Při tuhnutí (chladnutí) vyfukovaného polymeru je dále nutno upozornit, že vlivem rozdílných termoregulačních schopností obou temperačních systémů dochází k výrazným diferencím v distribuci teplotního pole napříč tloušťkou produktu, které můžou evokovat negativní ovlivnění kvality produktu. Příklad rozdílů teplotní distribuce v mezích tloušťky stěny polymeru je znázorněn na obrázku 48, kde byl polyethylenový produkt o tloušťce stěny 0,75 cm po dobu dvou minut ochlazován z teploty 180 °C a to pomocí desetistupňové cirkulující vody a vzduchu o teplotě 20 °C, tlaku 0,6 MPa. Ze znázorněných průběhů jsou evidentní značné rozdíly v rychlosti ochlazování obou systémů.



Obr. 48 Teplotní profil stěny polymeru při konvenčním vyfukovacím procesu [22]

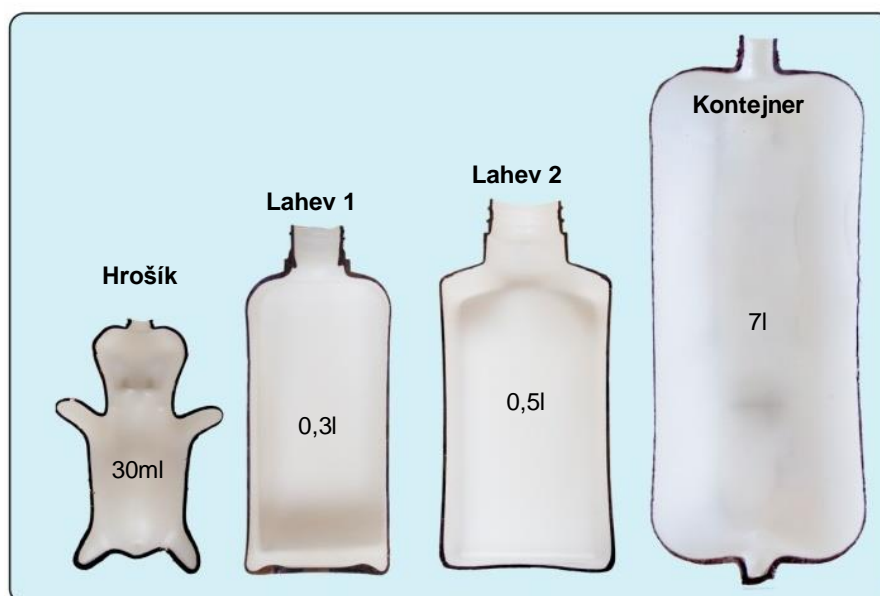
5 APLIKOVATELNOST SYSTÉMU VSTŘIKUJÍCÍ KAPALNÝ OXID UHLIČITÝ PRO VYFUKOVACÍ PROCES

Aplikace interního chlazení je vysoce efektivní způsob optimalizace výroby existujícího výrobního procesu, která umožňuje posouvat výrobní limity vyfukovacího procesu k vyšším hranicím. Z výše představených způsobů interního chlazení (kapitola 3.2) dosahuje jednoznačně nejvyšší účinnosti injektáž zkapalněných plynů. Přesto, že je tato technologie známa již řadu let, ve vyfukovacím procesu doposud nenalézá širší uplatnění. Jedním z důvodů může být nedostatečný rozbor dané problematiky. Při důkladné rešerši bylo nalezeno pouze několik studií (viz kapitola 3.2.3), ze kterých navíc není jednoznačně možné vyvodit obecné závěry o aplikovatelnosti této nekonvenční chladicí metody. Z těchto důvodů byly cíle plánovaných výzkumných aktivit směřovány k podání nezbytných informací, které by producentům usnadnily rozhodování o využití chladicího potenciálu oxidu uhličitého pro jejich výrobní sortiment. Pro splnění vytyčeného úkolu byl zvolen následující postup:

- Volba testovaných produktů a jejich materiálu
- Připojení CO₂ temperační jednotky do interního chladicího systému
vyfukovacího stroje
- Nalezení optimálního nastavení procesu injektáže CO₂
- Stanovení účinnosti chlazení CO₂ interního systému
- Ekonomické zhodnocení aplikovatelnosti CO₂ chladicího systému

5.1 Testované produkty

Všeobecně interpretovatelné hodnocení účinnosti CO₂ chladicího systému není možné provést na jednom produktu, jak tomu bylo v mnoha doposud publikovaných studiích, nýbrž je nezbytné systém testovat na skupině výrobků zastupujících co možná nejširší oblast produkce. S přihlédnutím k této skutečnosti a k výrobním limitům firmy GDK s.r.o. byly z dostupného produkčního portfolia vybrány čtyři zástupci. Jedná se o sedmilitrový 500 gramů vážící kontejner s průměrnou tloušťkou stěny 4 mm reprezentující produkty velkých objemů. Dále 0,5 litrová lahev o váze 50 gramů a tloušťce stěny 1,5 mm, která reprezentuje produkty středních rozměrů, stejně tak jako 0,3 litrová lahev o váze 30 gramů, průměrné tloušťce stěny 1,7 mm. Posledním vybraným produktem byla malá tvarově složitá třiceti mililitrová, 10 gramů vážící hračka – „Hrošík“ s tloušťkou stěny 1,8 mm. Důvod pro realizaci (průmyslový vzor- 35582, příloha 1 práce) právě tohoto produktu spočíval ve snaze zjistit chladicí schopnosti CO₂ v tvarově složitých částech výrobků. Tvar a rozložení tlouštěk stěn všech testovaných produktů je znázorněn v obrázku 49.

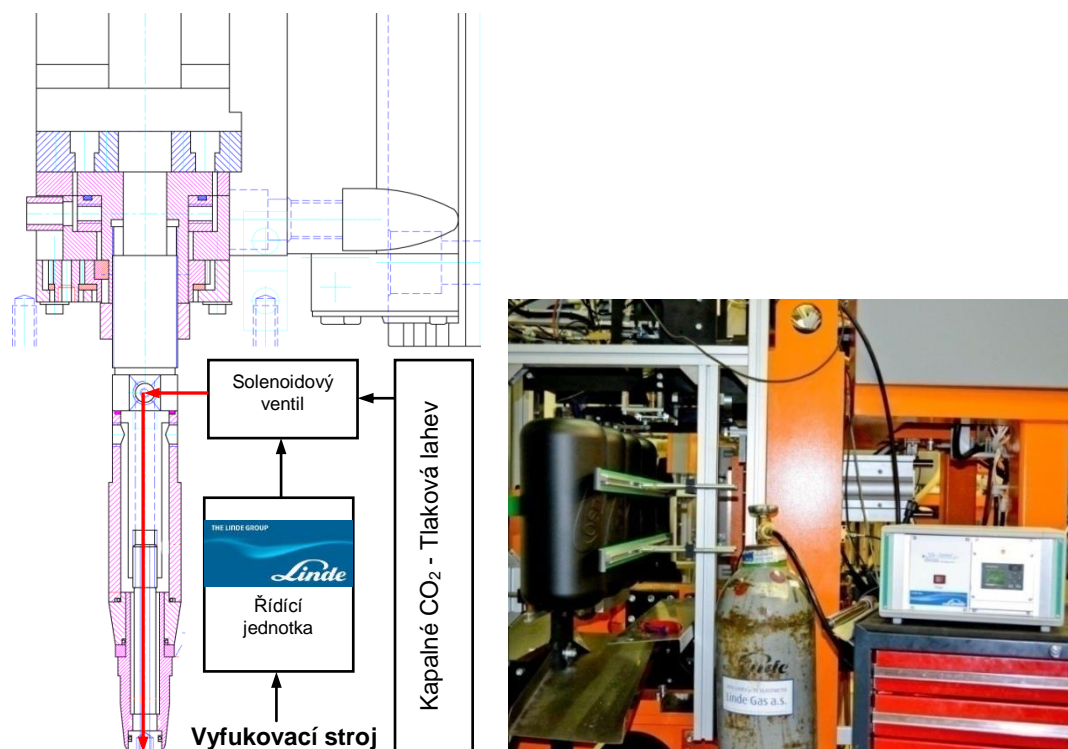


Obr. 49 Distribuce tloušťky stěny vybraných testovaných produktů

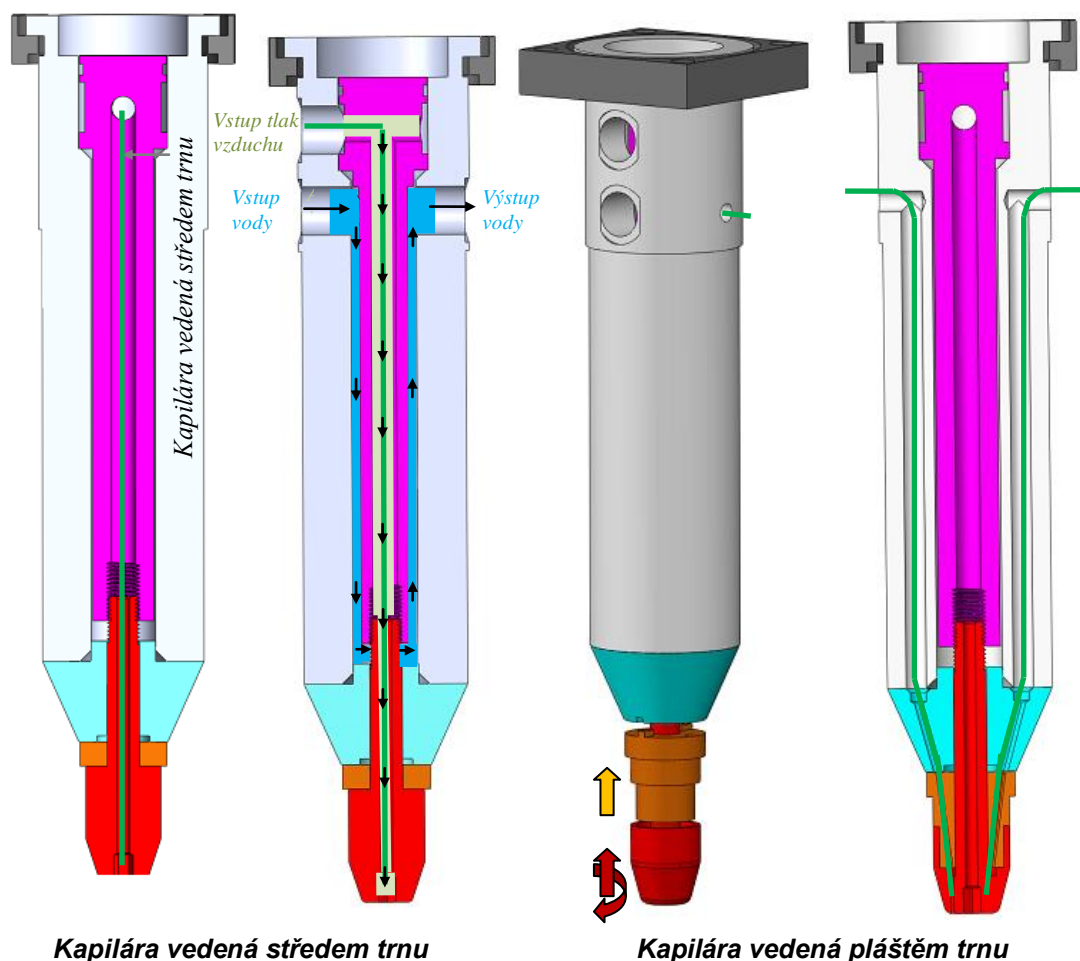
Dalším důležitým aspektem byla volba materiálu. V produkci více či méně uzavřených dutých produktů jsou definitivně nepoužívanějšími materiály polyolefiny [1]. Proto byla také testovací produkce realizována z běžně dostupného polyetylenu Liten BB29 (Unipetrol RPA). Liten BB29 je lineární, vysoce-hustotní kopolymer, vyznačující se velmi dobrou zpracovatelností, dobrou houževnatostí, tuhostí a odolností proti tenzo-aktivním látkám. Je vhodný pro výrobu dutých produktů do objemu až 120 litrů jako jsou lahve, kanystry, sudy, trubky a další beztlaké aplikace.

5.2 Připojení CO₂ temperační jednotky do interního chladicího systému vyfukovacího stroje

Pro prvotní experimentální posouzení aplikovatelnosti CO₂ temperačního systému bylo využito stávající zařízení firmy Linde a.s., které je určeno primárně pro technologii lokálního chlazení „SPOT COOLING“. Jedná se o jednotku skládající se ze standardních prvků, kterými jsou solenoidové ventily, kapiláry, tlakové rozvody a řídicí jednotky, viz kap. 3.2.3. Po propojení jednotlivých členů systému bylo nutné vytvořit komunikační rozhraní mezi jednotkou a extruzním vyfukovacím strojem umožňující časování vstřikované dávky. Tato vazba byla úspěšně realizována propojením koncového snímače uzavírací jednotky stroje s iniciačním snímačem temperační jednotky. Další krok spočíval v přívodu CO₂ do chlazeného místa. K přívodu kapalného oxidu uhličitého do vnitřních prostor dutých výrobků bylo s výhodou využito velikosti kapilár (vnější průměr 1,6 mm a vnitřní 0,5 mm), která umožnila jejich implementaci přívodem tlakového vzduchu středem vyfukovacího trnu. Pro maximální využití chladicího potenciálu CO₂ byly kapiláry přivedeny co nejbližše k ústí kalibračního trnu, obrázek 50. Kromě představeného způsobu přívodu chladiva lze zajistit dodávky kapalného CO₂ do expanzního prostoru i dalšími způsoby, jako například vedením kapilár pláštěm trnu, obr. 51, nebo použitím speciálních jehel. Obě tyto varianty vyžadují investiční náklady (výroba vyfukovacího kalibračního trnu, ovládací mechanismy jehel, atd.) a proto nebyly dále uvažovány.



Obr. 50 Schéma připojení Linde CO₂ temperační jednotky k vyfukovacímu stroji



Obr. 51 Navržené způsoby přívodu kapalného CO₂ do expanzního prostoru

5.3 Optimální nastavení procesu injektáže CO₂

Před testováním efektivity CO₂ temperačního systému bylo nejprve nutné vyřešit otázky, jakým způsobem a v jakém množství dávkovat CO₂. Současné technické řešení řízení vyfukovacích procesů umožňuje pouze dvě možnosti aplikace CO₂, viz obrázek 52. První, teoreticky nejefektivnější variantou, je přivedení CO₂ v okamžiku tvarování produktu, kdy má produkt nejvyšší teplotu. Nicméně je zde nutné upozornit na reálné riziko příliš rychlého ochlazení stěn produktu (expandující CO₂ -78 °C), které může zapříčinit ztrátu tvarovatelnosti a následně nedostatečné vytvarování produktu. Proto byla tato chladicí varianta testována na produktech vyznačujících se malými tloušťkami stěn (0,3 litrová lahev), kde je riziko uvedeného efektu nejvyšší. Na produkováných výrobcích nebyly pozorovány žádné problémy související s tvarováním produktu, vznikla zde však jiná neakceptovatelná vada, a to zvrásnění povrchu. Vzhledem k těmto negativům nebyl způsob přívodu chladiva v počáteční fázi výroby, tvarování produktu, dále uvažován.



Varianta 1 – přívod oxidu uhličitého v počátku vyfukovacího procesu



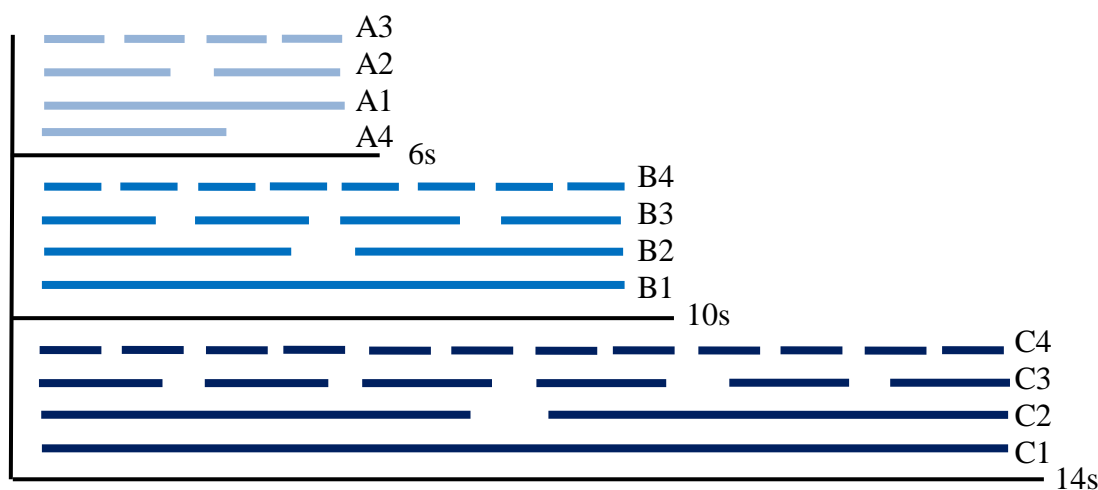
Varianta 2 – přívod oxidu uhličitého na konci vyfukovacího procesu

Obr. 52 Možnosti aplikace oxidu uhličitého ve vyfukovacím procesu

Druhou možností aplikace CO₂, použitou pro realizovaná experimentální měření, je přivedení chladícího média na konci vyfukovacího procesu. Výrobek je zde chlazen proudem expandujícího chladícího média, které je po odebrání tepelné energie odváděno otevřeným odvětrávacím ventilem pneumatického systému do okolní atmosféry. Jedná se o klasickou variantu interního chlazení.

Nyní nastala otázka, jakým způsobem CO₂ dávkovat, zda využít kontinuálního způsobu injektáže či přerušovaného dávkování. Technologie „SPOT COOLING“ je v současnosti využívána především pro lokální zvýšení chladících schopností vstřikovacích forem, v místech, kde konstrukční dispozice jádra neumožňují tvorbu temperačních kanálů, jako jsou například dlouhá a tenká tvarová jádra. Pro tuto technologickou aplikaci je doporučený způsob dávkování přerušovaná injektáž. Při kontinuálním dávkování totiž dochází v expanzních prostorách tenkých jader (cca 2 mm průměru) k intenzivnímu unášení atomizovaných částic CO₂, které nepředají všechnu svoji tepelnou energii nástroji. Z hlediska efektivity je proto výhodnější aplikovat přerušovaný způsob dávkování, kde expandující médium má výhodnější časové podmínky tepelné výměny, což umožňuje předání větší části tepelné energie, než při aplikaci kontinuální injektáže. Ve vyfukovacím procesu je však situace diametrálně odlišná. Expanzní prostor není tvořen tenkým kanálem, nýbrž zaujímá mnohonásobně větší objem (v našem případě 30 ml, 0,3l, 0,5l a 7 l). Navíc přerušovaný způsob dávkování může evokovat pokles interního tlaku plynného média působícího na stěny chladnoucího výrobku a způsobit tak pokles účinnosti externího systému vyfukovací formy (viz kapitola 3.1.2). Vzhledem k výše uvedenému rozboru a skutečností, že doposud nejsou evidovány žádné studie zabývající se problematikou optimálního nastavení procesu injektáže kapalného CO₂ za účelem interního chlazení vyfukovacího procesu, byla další dílčí aktivita zaměřena na podrobnou analýzu této problematiky.

Analýza vhodného způsobu dávkování CO₂ pro vyfukovací proces byla provedena ve dvou úrovních. Nejprve byl za účelem získání informací o chladících charakteristikách injektovaného média aplikovaný CO₂ systém testován separátně mimo vyfukovací stroj. Následně byl temperační systém implementován do extruzně vyfukovacího zařízení a testován vliv procesního nastavení injektáže na celkovou efektivitu chlazení (součinnost externího a interního systému). Představené experimentální měření bylo provedeno na produkci 0,3 l produktu, při variacích nastavení injektáže představených v obrázku 53. V jednotlivých procesních nastaveních byly variovány jak kontinuální (A1, A4, B1, C1) a přerušované (A2, A3, B2, B3, B4, C2, C3, C4) způsoby injektáže, tak množství přiváděného média (A, B, C). Konkrétní parametry procesu injektáže jsou uvedeny v tabulce 6.



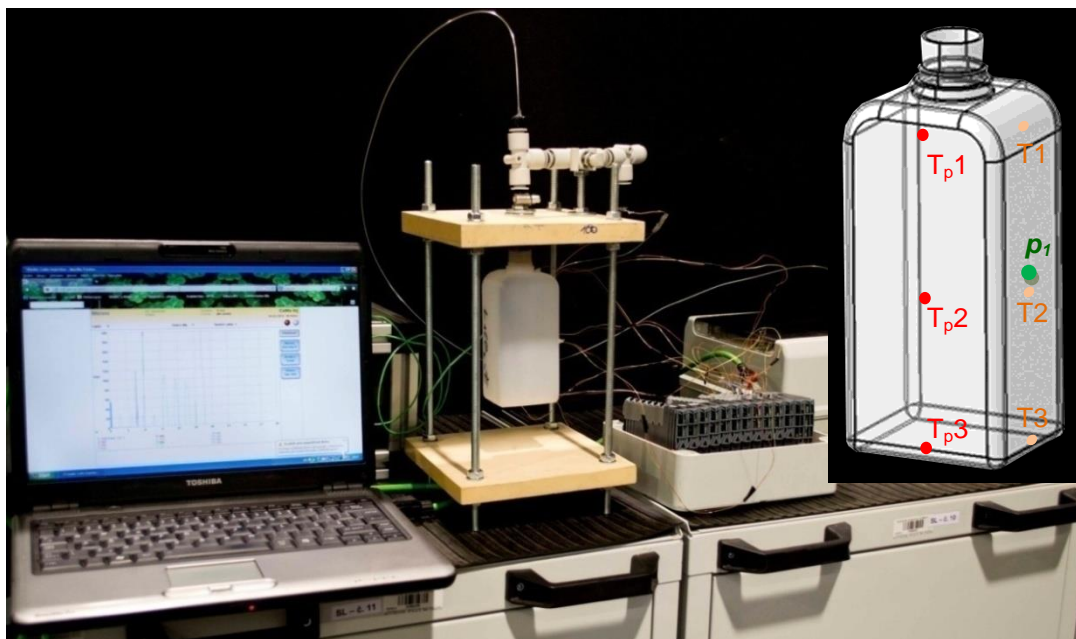
Obr. 53 Schéma experimentálního stanovení optimálního nastavení CO₂ chlazení

Tab. 6 Parametry experimentálního stanovení optimálního nastavení CO₂ chlazení

Č.	Čas vstřikování CO ₂	Prodleva (odvětrávání)	Počet cyklů	Celkový čas vstřikování CO ₂	Celkový čas operace
A1	4 s	-	1	4 s	4 s
A2	1 s	1 s	2	2 s	4 s
A3	0,5 s	0,5 s	4	2 s	4 s
A4	2s	-	1	2s	2s
B1	8 s	-	1	8 s	8 s
B2	3 s	1 s	2	6 s	8s
B3	1 s	1 s	4	4 s	8 s
B4	0,5 s	0,5 s	8	4 s	8 s
C1	12 s	-	1	12 s	12 s
C2	4 s	2 s	2	8s	12 s
C3	1 s	1 s	6	6 s	12 s
C4	0,5 s	0,5 s	12	6 s	12 s

5.3.1 Testování optimálního nastavení injektáže CO₂ separovaného interního systému

Extruzně vyfukovací proces je technologicky náročný proces, ve kterém je experimentálně velmi obtížné, ne-li nemožné, rozlišit množství tepelné energie odebrané externími a interními chladicími systémy. Efektivita temperačně chladicího systému vyfukovací formy dosahuje jednoznačně vyšších účinností, proto i předpokládané změny ve způsobech injektáže CO₂ budou značně ovlivněny tepelným odvodem formy. Pro objektivní posouzení vlivu způsobu dávkování na efektivitu CO₂ chlazení byla v prvotní fázi experimentálního měření interní část chlazení zcela oddělena. Způsob realizace separace je znázorněn na obrázku 54. Kalibrační trn s kapilárou vedenou středem trnu je fixován ve svislé pozici přípravku. Na trn je nasazen testovaný produkt (ve stejné pozici jako při běžné horizontální extruzně vyfukovací produkci), na který působí ve všech vnějších lokacích atmosférické prostředí, čímž je zajištěno minimální ovlivnění procesu interního chlazení, a tedy získání co nejobektivnějších informací o testovaných variantách interního chlazení. Vzduch má totiž při standardních podmínkách velice nízký součinitel přestupu tepla.



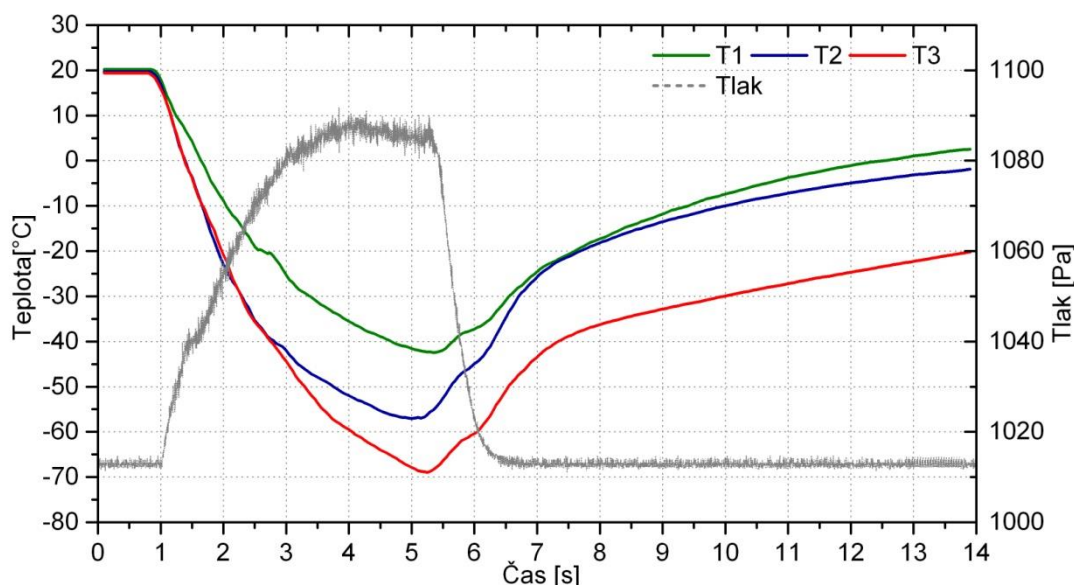
Obr. 54 Experimentální přípravek pro separaci interního chladicího systému

Za účelem nalezení optimálního způsobu interního chlazení byly do vnitřních lokací produktu implementovány teplotní (T1, T2, T3) a tlakové senzory (p₁), viz obrázek 54. Z široké škály teplotních senzorů byly zvoleny opláštěné Cr - Ni termočlánky typu K o průměru 0,01 palců, o rozsahu použitelnosti -200 °C až 1200 °C, třídě přesnosti II (toleranční hodnota 0,75 %) a rychlosti odezvy

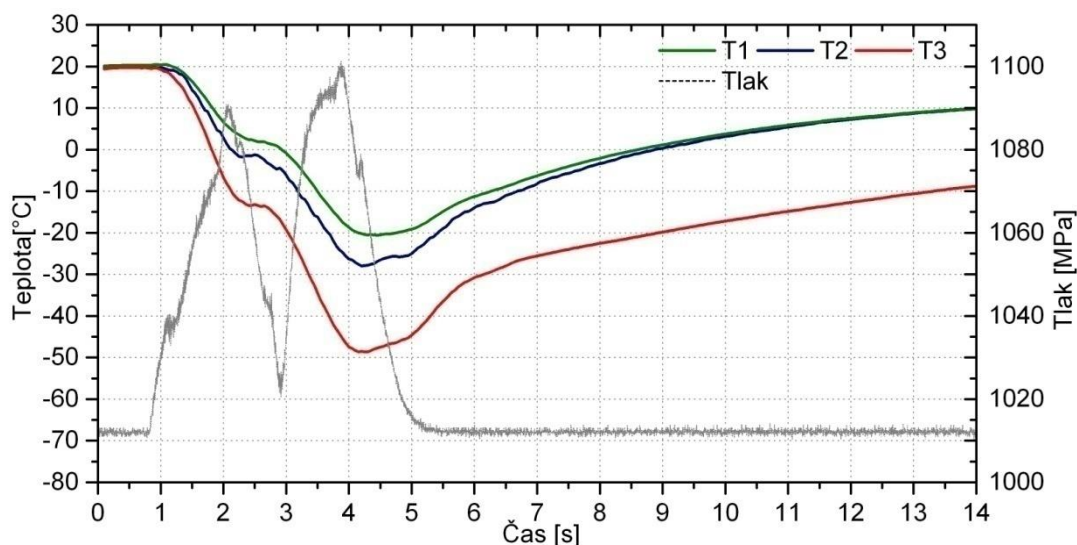
v řádech tisícín sekundy. Pro monitorizaci a záznam teplotně-časových průběhů bylo použito zařízení DigWeld. Tlakové průběhy expandujícího média byly hodnoceny pomocí snímače PSE530-R06 (rozsah měřících tlaků 0 až 1 MPa, chyba měření $\pm 2 \%$) připojeného k měřicímu záznamovému zařízení společnosti TG Motion. Pro všechna experimentální měření byla nastavena snímkovací frekvence 20 snímků za sekundu v případě měření teplot a 1000 snímků za sekundu v případě měření tlaků. Kromě teplotních a tlakových průběhů interního chladicího média byl dalším pozorovaným parametrem ochlazovací efekt injektovaného média. Efektivita chlazení jednotlivých experimentálních variant byla posuzována pomocí termovizních snímků čela produktu pořízených termo kamerou FLIR 660 s rozlišením detektoru 640 x 480, citlivosti detektoru 0,03 °C, doporučeným teplotním rozsahem -50 °C až +500 °C a přesností $\pm 2 \%$. Vyhodnocení termovizních snímků softwarem ThermoCAMTM ResearcherTM 2.9 pak umožnilo stanovení teplot zvolených bodů T_{p1} , T_{p2} , T_{p3} a také průměrných, minimálních a maximálních teplot vymezených teplotních polí (čelo produktu).

V následujících odstavcích jsou představeny výsledky realizovaného experimentálního měření. Výsledky jsou z hlediska délky operace a prodlevy vymezené pro injektáž CO₂ rozděleny do tří hlavních skupin (A, B, C). V každé skupině jsou vzájemně porovnány teplotně tlakové průběhy testovaných variací dávkování média s efektivitou chlazení hodnocenou pomocí termovizních snímků.

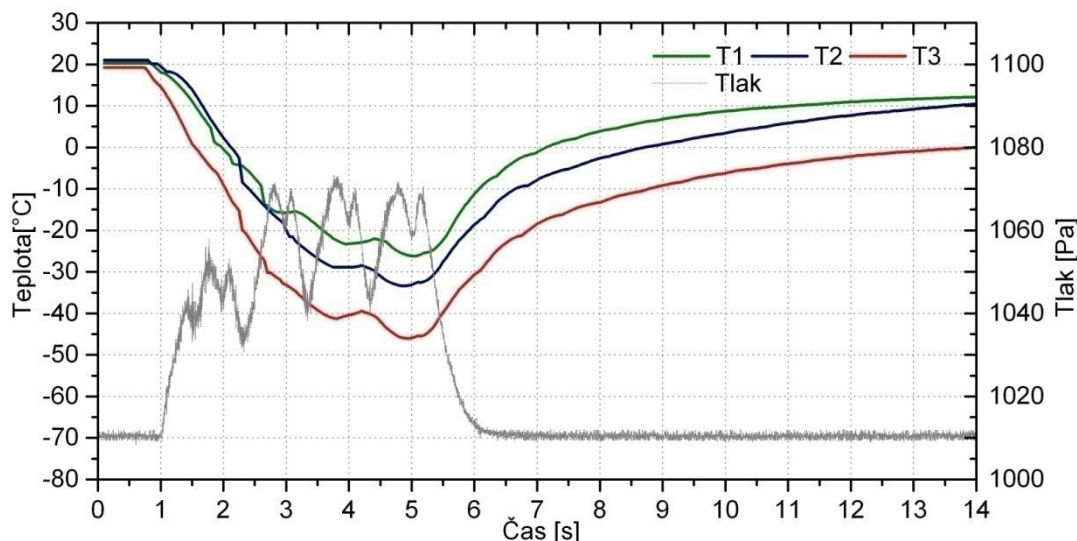
Teplotně tlakové průběhy expandujícího média – varianta injektáže A



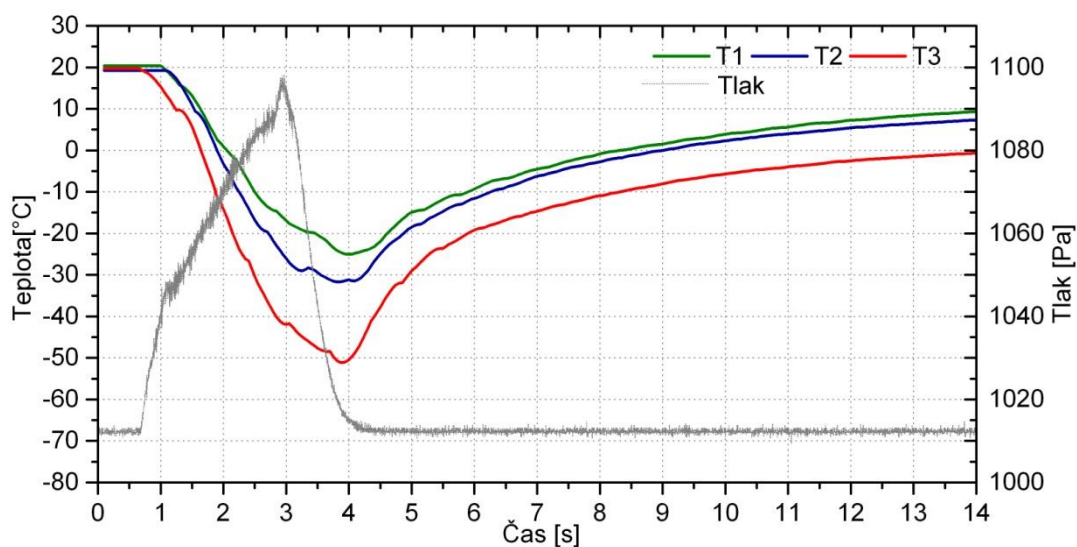
Obr. 55 Teplotně tlakové průběhy expandovaného CO₂ při variantě chlazení A1 (4s)



Obr. 56 Teplotně tlakové průběhy expandovaného CO₂ - varianta A2 (2x1s)



Obr. 57 Teplotně tlakové průběhy expandovaného CO₂ - varianta A3 (4x0,5s)



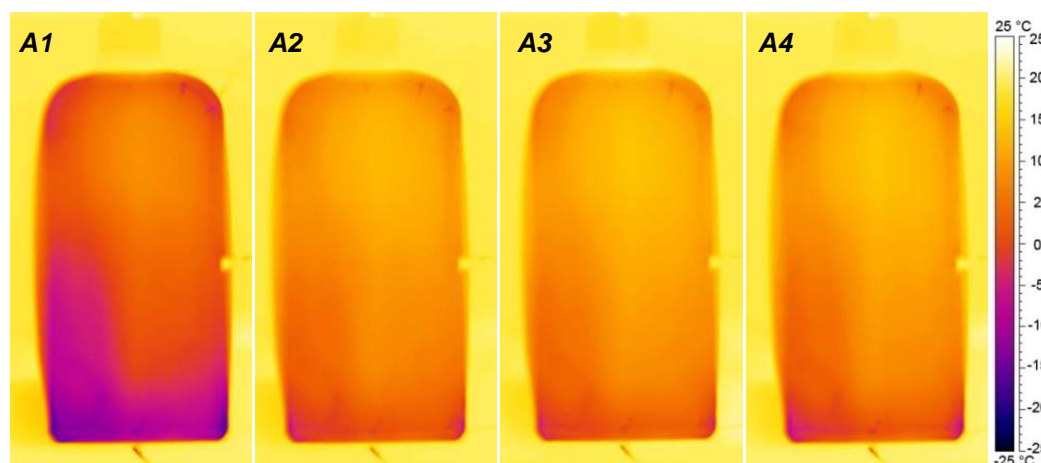
Obr. 58 Teplotně tlakové průběhy expandovaného CO₂ při variantě chlazení A4 (2s)

Ze zaznamenaných teplotních průběhů expandujícího CO₂ je evidentní výrazné snížení poklesu, či stagnace interních teplot dutiny nádoby (termočlánky T1, T2, T3) v časovém okamžiku odpovídajícím přerušení injektáže. Kontinuální injektáž (A1, obrázek 55) umožňuje ve vymezeném čtyř sekundovém úseku pro dávkování média, v důsledku přívodu vyššího množství CO₂, dosažení nižších interních teplot a lze tedy předpokládat dosažení vyššího chladicího efektu. Z porovnání zaznamenaných teplotních průběhů chladících variant, ve kterých bylo dávkováno stejné množství CO₂ v rozdílných časových periodách (A2, A3, A4), viz obrázek 56 až 58, není možné vyvodit jednoznačné závěry. Množství dávkovaného CO₂ je velmi malé (2 s; 4,4 g), a proto lze předpokládat, že difference mezi jednotlivými testovanými variantami bude více transparentní s rostoucím množstvím média v dalších experimentálních měřeních. Minimální dosažené hodnoty interního prostředí ve zvolených lokacích jsou uvedeny v tabulce 7. Ze zobrazených tlakových průběhů je zřejmé, že prodleva mezi injektážemi body způsobuje pokles interního tlaku, který je přímo závislý na její délce. Dále, že při kontinuální injektáži (jedna kapilára) se hodnota interního tlaku po přibližně 2 sekundách ustaví na maximální hodnotě.

Tab. 7 Minimální dosažená interní teplota CO₂ při variantě chlazení A

Varianta chlazení	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
A1 (4s)	-42,3	-57,0	-69,0
A2 (2x1s)	-20,5	-28,7	-49,1
A3 (4x0,5s)	-22,9	-31,5	-44,8
A4 (2s)	-23,1	-30,8	-51,6

Efektivita chlazení – varianta injektáže A



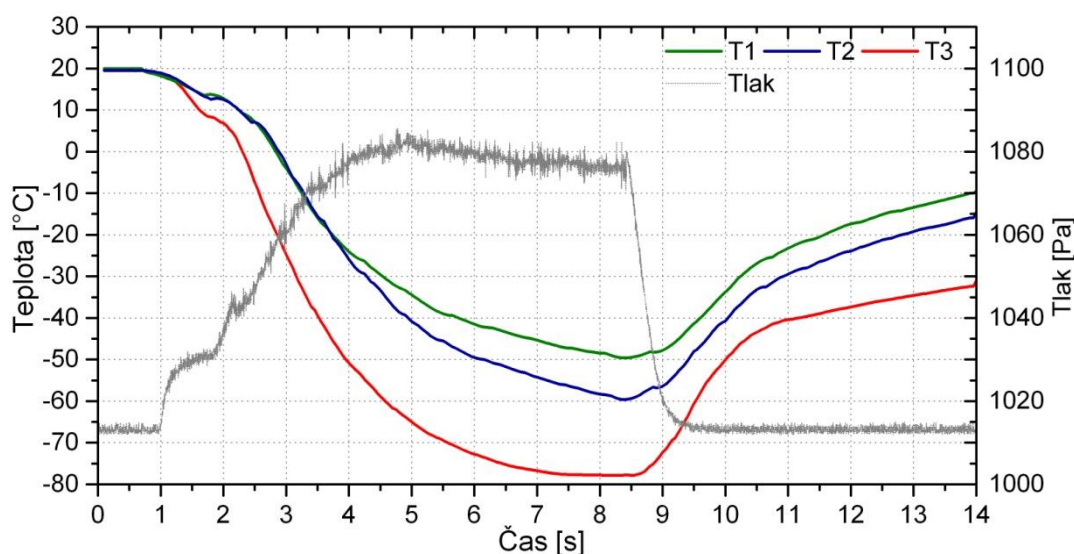
Obr. 59 Vnější teplotní pole produktu po aplikaci testovaných variant injektáže A

Z teplotní distribuce termovizních snímků (obrázek 59), korespondujících konci fáze injektáže CO₂, lze potvrdit výše uvedený předpoklad o vyšším chladícím efektu kontinuální chladicí varianty A1, který je zapříčiněn přívodem vyššího množství chladicího média. Jsou-li porovnány výsledná teplotní pole chladících variant A2, A3, A4 (stejně množství CO₂, rozdílný způsob dávkování), jeví se jako nepatrně výhodnější způsob přívodu média kontinuální variantou dávkování. Pro získání konkrétní představy o chladícím efektu jednotlivých testovaných variant byly z termovizních snímků stanoveny průměrné, minimální, maximální teploty a teploty zvolených bodů (obr. 54). Vyhodnocená data, představená v tabulce 8, odpovídají vyvozeným závěrům. V případě dávkovacích variant A2, A3, A4 je však nutno upozornit na velmi malé rozdíly, které neumožňují, stejně jako v případě průběhu interní teploty média, vyvodit obecné závěry.

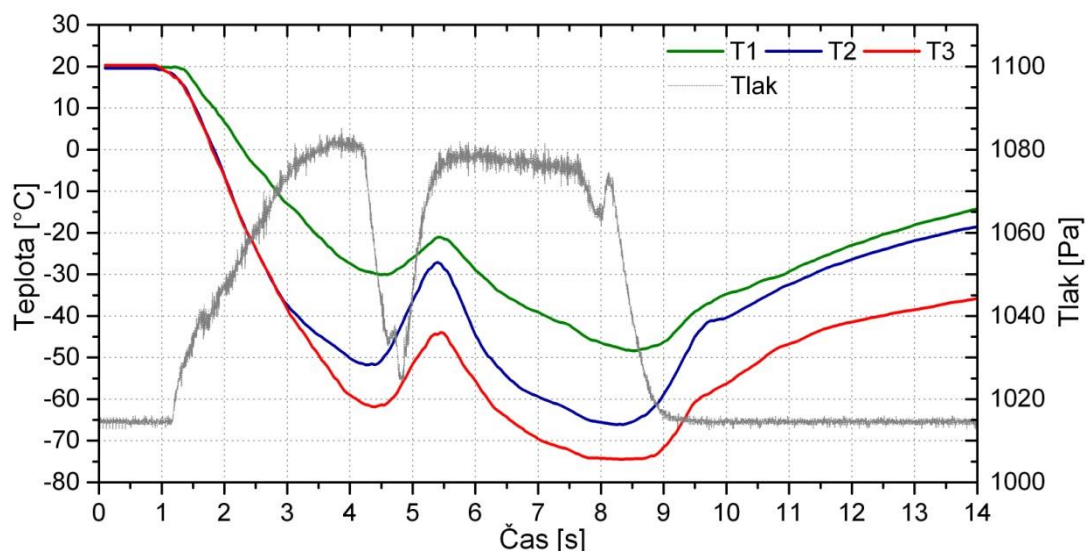
Tab. 8 Vyhodnocené parametry termovizních snímků při variantě chlazení A

Varianta chlazení	T _{p1} [°C]	T _{p2} [°C]	T _{p3} [°C]	Průměrná teplota [°C]	Minimální teplota [°C]	Maximální teplota [°C]
A1	6,3	3,6	-8,2	0,1	-18,2	19,8
A2	11,4	10,9	2,9	8,5	-5,7	20,0
A3	12,5	11,4	3,5	9,1	-4,3	20,0
A4	10,9	9,6	2,5	8,0	-6,6	20,0

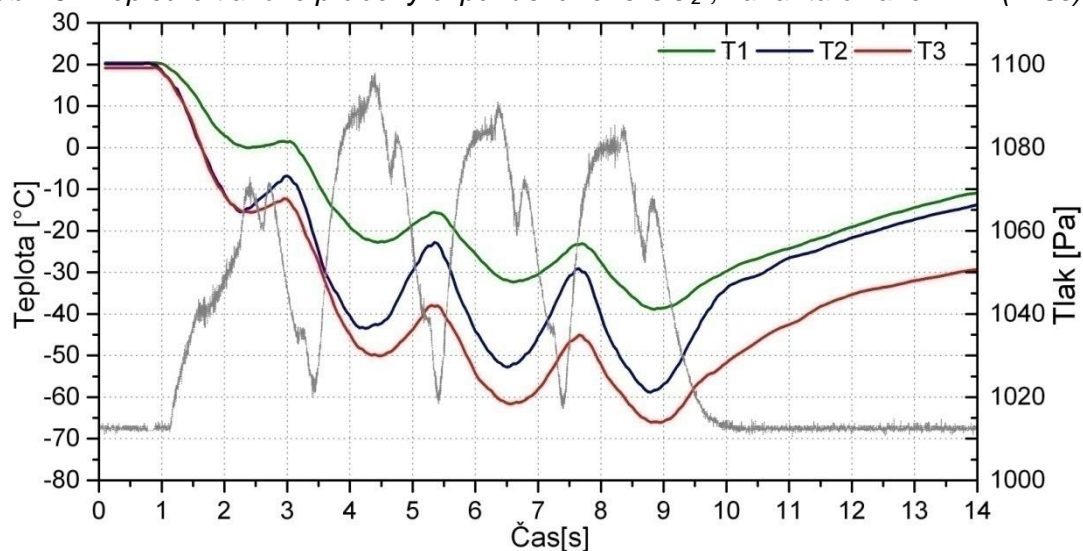
Teplotně-tlakové průběhy expandujícího média – varianta injektáže B



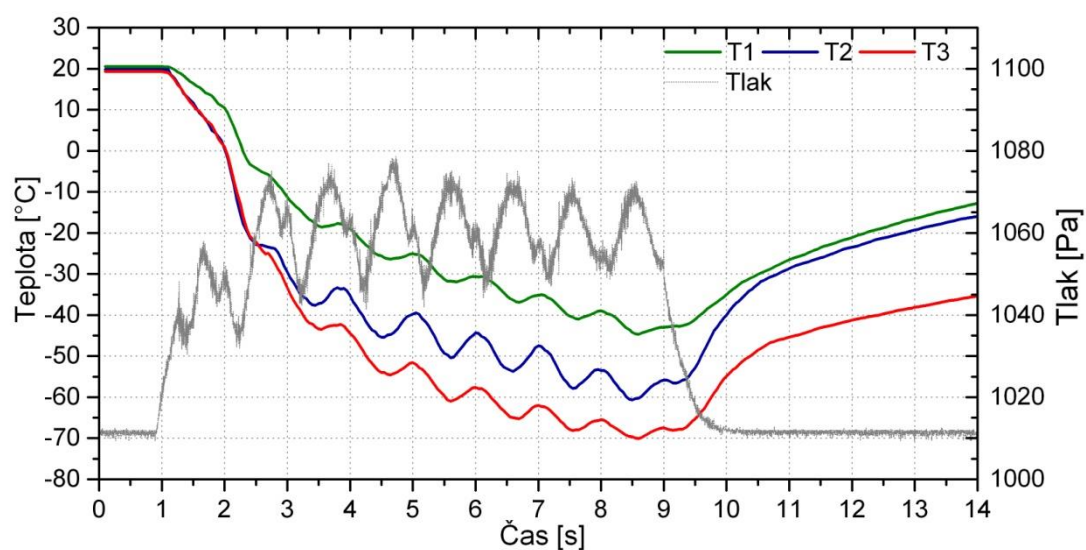
Obr. 60 Teplotně tlakové průběhy expandovaného CO₂ při variantě chlazení B1 (8s)



Obr. 61 Teplotně tlakové průběhy expandovaného CO₂, varianta chlazení B2 (2x6s)



Obr. 62 Teplotně tlakové průběhy expandovaného CO₂, varianta chlazení B3 (4x1s)



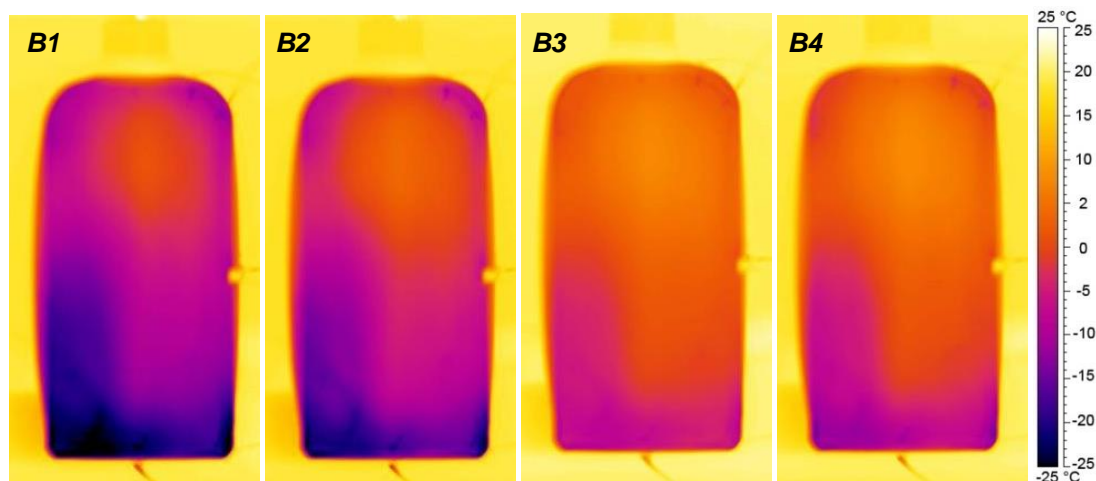
Obr. 63 Teplotn -tlakové průběhy expandovaného CO₂, varianta chlazení B4 (8x0,5s)

Jsou-li porovnány interní teplotní průběhy expandujícího CO₂ odpovídající dávkovacím variantám B, tzn. vymezenému osmisekundovému úseku pro injektáž, je rovněž zde zřejmé dosažení nejnižších teplotních průběhů, a tedy předpokladu nejvyšší efektivity chlazení při nepřetržité dodávce média (nejvyšší množství chladícího média, 17,6 g), viz obrázky 60 až 63. Je-li aplikována periodická injektáž, dochází v důsledku přerušení dodávky chladícího média k poklesům interního chladícího efektu. S rostoucí délkou prodlev klesá hodnota i rychlost dosažení teplotních minim (tabulka 9). Například při kontinuální chladící variantě bylo dosaženo maximálního teoretického chladícího efektu CO₂, teploty -78 °C (T3), po šesti sekundách injektáže (13,3 g CO₂). Jednosekundové přerušení kontinuálního dávkování (B2) způsobilo prodloužení času dosažení minimální teploty o 2 sekundy (viz obr. 61) a jednosekundová periodicitu mezi injektážemi a prodlevou (B3), viz obr. 62, snížení minimální dosahované teploty (T3) přibližně o deset stupňů. Chladící varianta B4 (obr. 63) deklaruje dosažení výhodnějších teplotních průběhů, je-li aplikováno (při stejném množství CO₂ s chladící variantou B3) zkrácení prodlevy injektáže na úkor vyššího počtu dávek. Ze zobrazených závislostí je rovněž evidentní, že kromě teploty se s rostoucí délkou prodlev adekvátně zvětšuje i pokles interního tlaku.

Tab. 9 Minimální dosažená interní teplota CO₂ při variantě chlazení B

Varianta chlazení	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
B1 (8s)	-50,1	-60,3	-78,0
B2 (2x3s)	-49,7	-66,7	-74,8
B3 (4x1s)	38,8	-61,5	-67,9
B4 (8x0,5s)	-44,1	-61,9	-70,2

Efektivita chlazení – varianta injektáže B



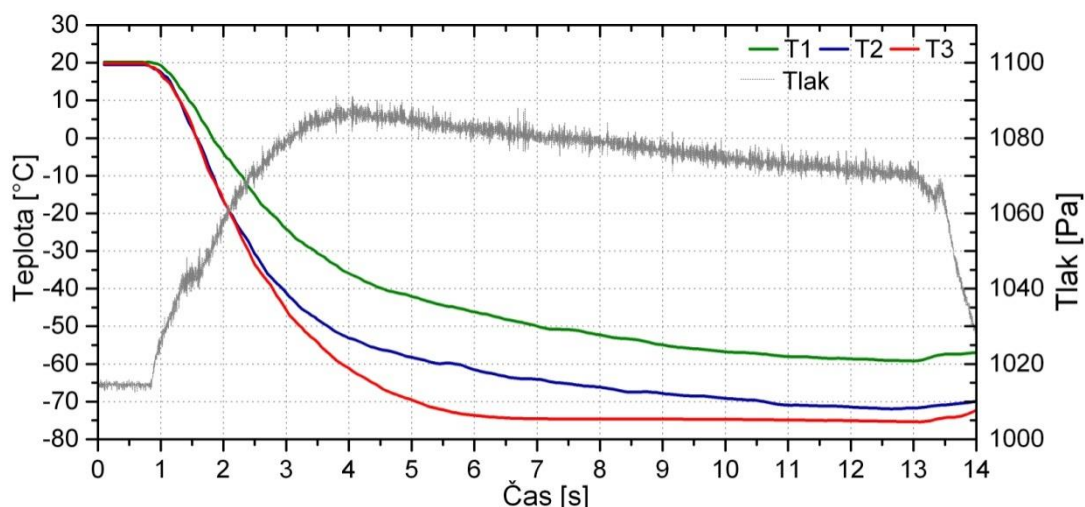
Obr. 64 Vnější teplotní pole produktu po aplikaci testovaných variant injektáže B

Termovizní snímky konce fáze injektáže (obrázek 64) potvrzují vyřčené tvrzení o vlivu prodlevy injektáže na teplotní průběh chlazení interního prostředí, a tedy jeho efektivitu. Stejně jako v předcházejícím experimentálním měření (varianta dávkování A) bylo dosaženo nejvyššího chladicího efektu při kontinuálním dávkování. Jednosekundová prodleva v přívodu média způsobila výrazný pokles chladicího efektu i dosahovaných teplot produktu, viz tabulka 10. Z porovnání termovizních snímků i vyhodnocených teplotních parametrů chladících variant, které využívají stejné množství média (B3, B4), je zřejmé, že vyššího chladicího efektu je dosažováno při aplikaci kratší prodlevy mezi injektážními body.

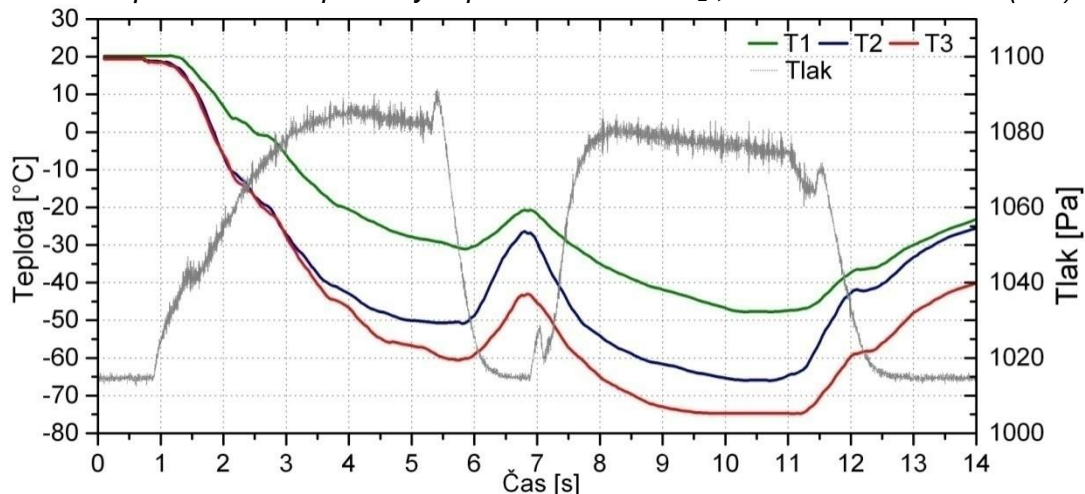
Tab. 10 Vyhodnocené parametry termovizních snímků při variantě chlazení B

Varianta chlazení	T _{p1} [°C]	T _{p2} [°C]	T _{p3} [°C]	Průměrná teplota [°C]	Minimální teplota [°C]	Maximální teplota [°C]
B1	-6,1	-3,1	-27,9	-15,5	-38,1	19,8
B2	-5,4	-1,3	-21,2	-7,4	-23,1	19,8
B3	2,4	2,0	-8,2	-1,8	-14,2	20,0
B4	-3,5	0,1	-13,6	-2,9	-17,7	19,9

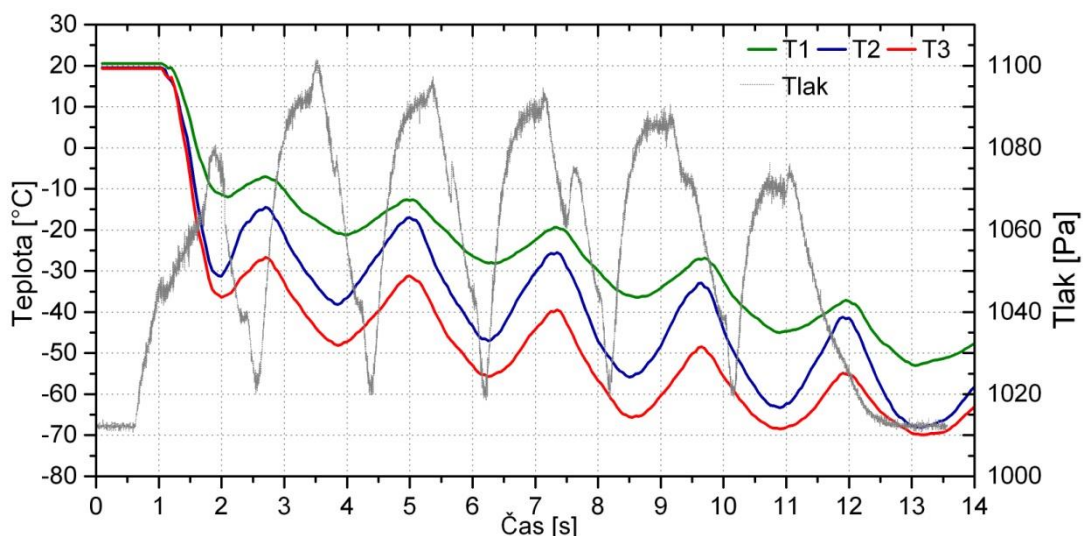
Teplotně tlakové průběhy expandujícího média – varianta injektáže C



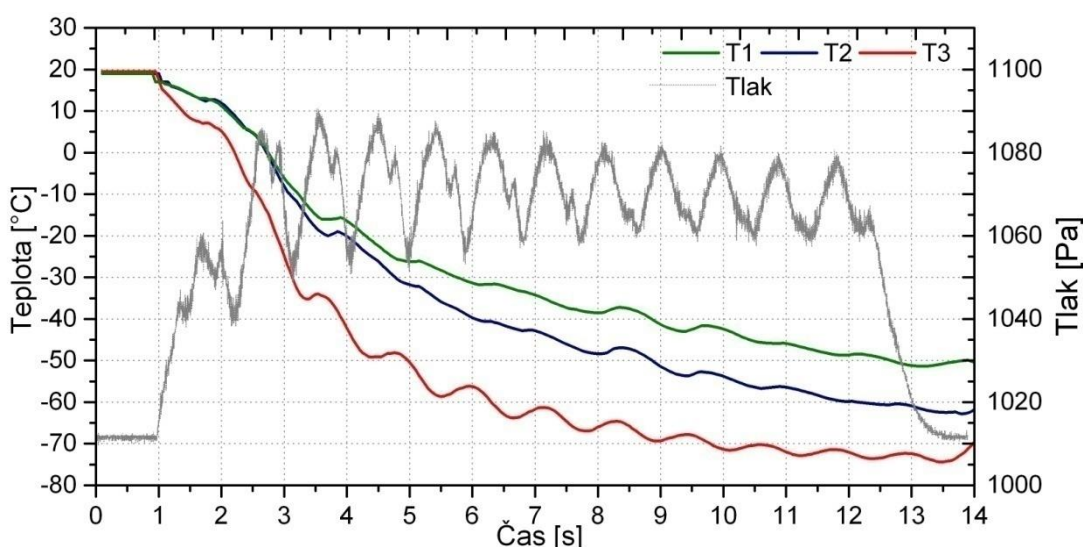
Obr. 65 Teplotně tlakové průběhy expandovaného CO₂, varianta chlazení C1 (12s)



Obr. 66 Teplotně tlakové průběhy expandovaného CO₂, varianta chlazení C2 (2x4s)



Obr. 67 Teplotně tlakové průběhy expandovaného CO₂ ,varianta chlazení C3 (6x1s)



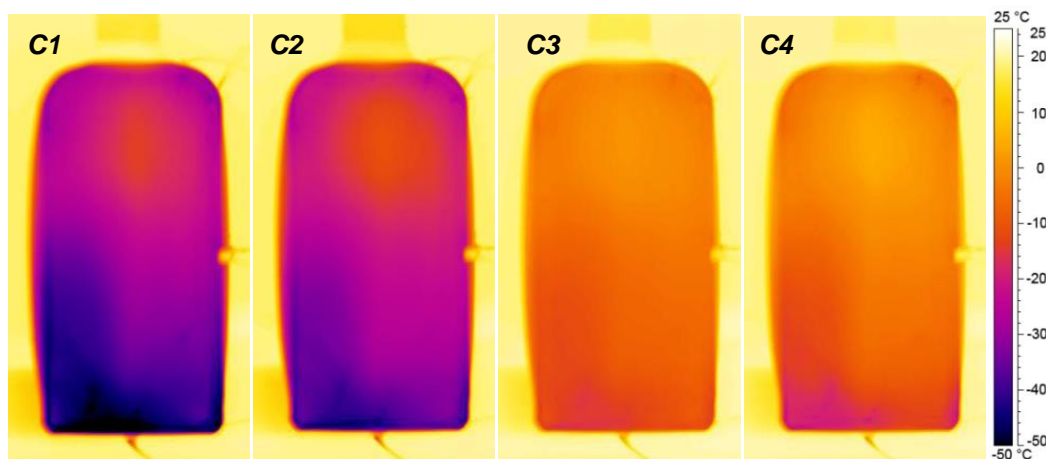
Obr. 68 Teplotně-tlakové průběhy expandovaného CO₂ varianta C4 (12x0,5s)

Rovněž teplotní a tlakové průběhy interního prostředí při iniciaci chladící varianty C (vymezeném dvanáctisekundovém úseku pro injektáž) vykazují stejné závislosti jako v přecházejících případech (varianty A, B). Maximální chladicí efekt CO₂ (-78 °C) byl ve spodní části produktu dosažen při přibližně 6 sekundách kontinuálního přívodu média (obr. 65). Dvousekundová prodleva v kontinuální injektáži způsobila výrazný nárůst interní teploty, pokles tlaku interního prostředí a posunutí času dosažení minimální teploty (obr. 66). Kratší prodleva v cyklických injektážních variantách (C3, C4; stejné množství chladiva) zapříčinila dosažení výhodnějších teplotně tlakových průběhů, dosažení nižších interních teplot a lze tedy předpokládat i dosažení vyššího chladicího efektu.

Tab. 11 Minimální dosažená interní teplota CO₂ při variantě chlazení C

Varianta chlazení	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
C1 (12s)	-59,7	-72,1	-77,5
C2 (2x4s)	-58,0	-67,5	-77,3
C3 (6x1s)	-52,3	-66,1	-70,1
C4 (12x0,5s)	-52,9	-63,8	-74,5

Efektivita chlazení – varianta injektáže C



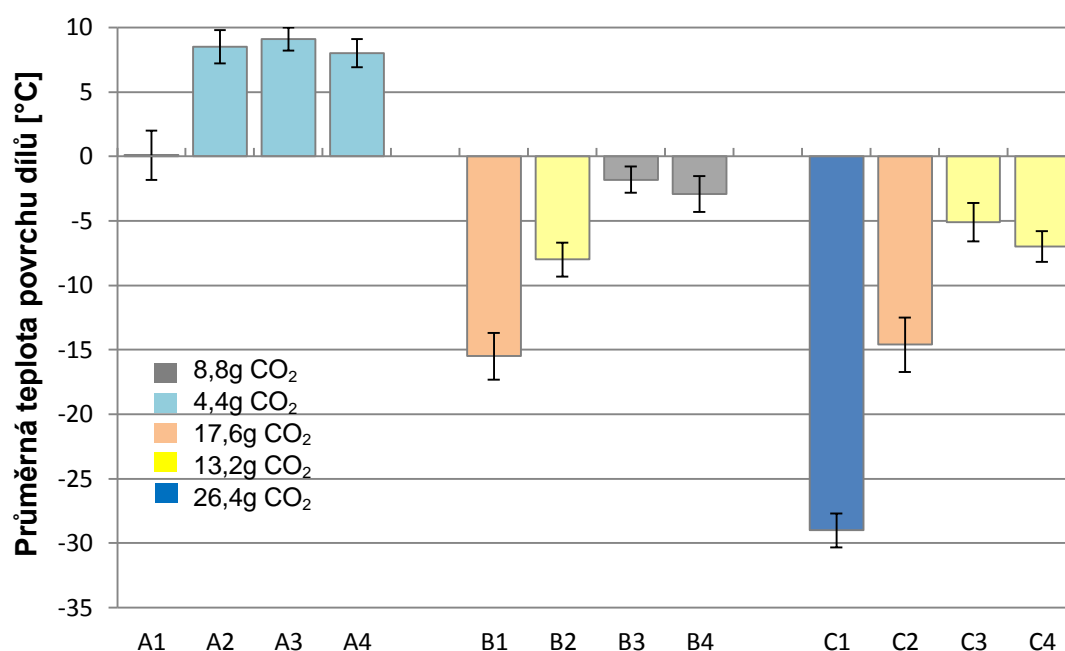
Obr. 69 Vnější teplotní pole produktu po aplikaci testovaných variant injektáže C

Pořízené termovizní snímky (konec fáze chlazení), znázorněné v obrázku 69, potvrzují predikované předpoklady o chladícím efektu testovaných variací injektáže. Maximálního chladícího efektu interního média a minimální vnější povrchové teploty produktu bylo dosaženo při dvanáctisekundovém (26,4 g CO₂) kontinuálním přívodu média. Produkt při této experimentální variantě dosahoval průměrné teploty -29 °C a minimální dokonce -57,6 °C. Prodleva injektáže v délce 2 sekund výrazně snížila chladící účinnost interního prostředí, které evokovalo cca 15 °C navýšení průměrné teploty produktu. Teplotní distribuce chladících variant C3, C4 (stejné množství chladícího média) potvrzuje predikci o vyšším chladícím potenciálu varianty chlazení C4, tzn. aplikaci vyššího počtu kratších dávek (kratší prodleva mezi injektážemi). Rozdíly v dosahovaných minimálních a průměrných teplotách produktu obou chladících variant činily 6 °C, respektive 2,2 °C.

Tab. 12 Vyhodnocené parametry termovizních snímků při variantě chlazení C

Varianta chlazení	T _{p1} [°C]	T _{p2} [°C]	T _{p3} [°C]	Průměrná teplota [°C]	Minimální teplota [°C]	Maximální teplota [°C]
C1	-21,6	-28,9	-48,6	-2,09	-57,6	19,1
C2	-19,5	-21,7	-38,3	-14,6	-48,0	19,7
C3	-2,9	-1,1	-12,7	-5,1	-19,0	20,0
C4	-3,4	-6,4	-15,3	-7,3	-25,0	19,9

Vzájemné srovnání jednotlivých variant injektáže

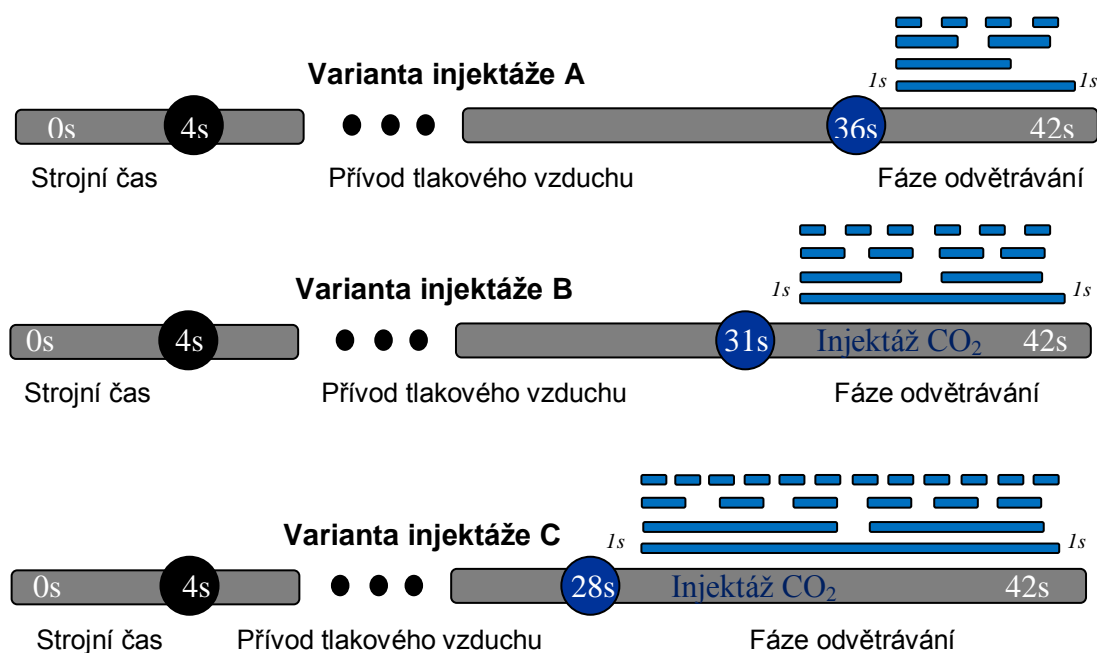


Obr. 70 Vzájemné porovnání efektivity chlazení jednotlivých variant injektáže

Pro zhodnocení testovaných variant injektáže dle použitého množství média, bez ohledu na čas vymezený pro jeho přívod, jsou dosahované efektivity chlazení (průměrné teploty povrchu čela produktů) vzájemně porovnány na obrázku 70. Kromě varianty dávkování A, kde bylo použito velmi malé množství chladícího média, lze u zbývajících experimentálních variant (B, C) souhlasit s výše vyslovenými závěry. Přerušení injektáže, stejně jako rostoucí délka prodlev mezi periodou vstřikováním CO₂, způsobuje nárůst interní teploty, který se následně projeví v poklesu účinnosti chlazení. Je zde však nutné upozornit také na skutečnost, že dosahované rozdíly jsou velmi malé. Nicméně z pozorovaných závislostí lze předpokládat, že s rostoucím množstvím použitého média porostou i dosahované rozdíly ve variacích injektáže.

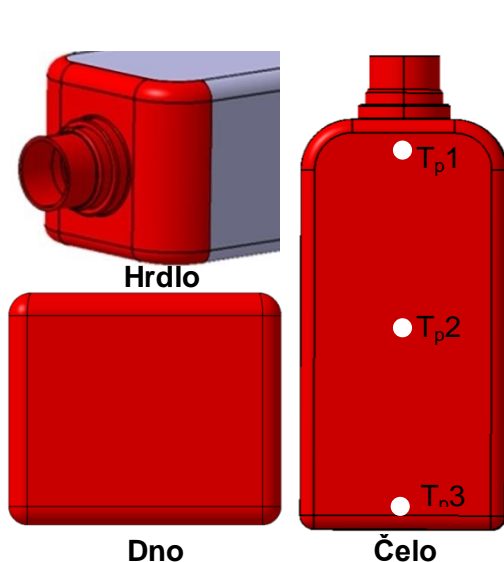
5.3.2 Testování optimálního nastavení injektáže CO₂ na vyfukovacím stroji

Druhá fáze nalezení optimálního nastavení procesu injektáže oxidu uhličitého použitého za účelem interního chlazení dutých výrobků spočívala v testování zvolených variant dávkování (tabulka 6) na vyfukovacím stroji. Jak již bylo předestřeno, ve vyfukovacím procesu je tepelná energie produktu odebrána externím temperačně chladicím systémem vyfukovací formy a interním chladicím systémem. Obě složky odvodu tepelné energie jsou vzájemně závislé. Kromě chladicího efektu interního chladicího média projeví právě zde svůj význam další pozorovaný parametr – tlak (kap. 5.3.1), který přitlačuje chladnouci produkt ke stěně vyfukovací formy, čímž vymezuje kvalitu kontaktu produktu se stěnou vyfukovací formy a částečně tak ovlivňuje efektivitu externího temperačně chladicího systému. Externí temperačně chladicí systém vyfukovací formy (cirkulace kapalného média - standardně vody o teplotě 5 až 20 °C) dosahuje, zejména při nízkých parametrech chladicího média, velmi vysokých účinností, které by značně zkreslily dosahované výsledky efektivy testovaných variací interního chlazení. Proto byla za účelem získání co nejvíce transparentních výsledků pro všechna experimentální měření nastavena teplota formy 50 °C. Kromě teploty formy byla dále nastavena také jednotná délka strojních a vyfukovacích časů i celkový čas produkce. Variovaným parametrem byla délka fáze odvětrávání. Ta byla vždy pro vymezený čas injektáže média (varianty chlazení A, B, C) kvůli zajištění odvodu média z dutiny produktu, a tedy bezpečnému odformování, zvýšena o 1 sekundovou periodu. Schéma experimentálního měření je představeno na obrázku 71.

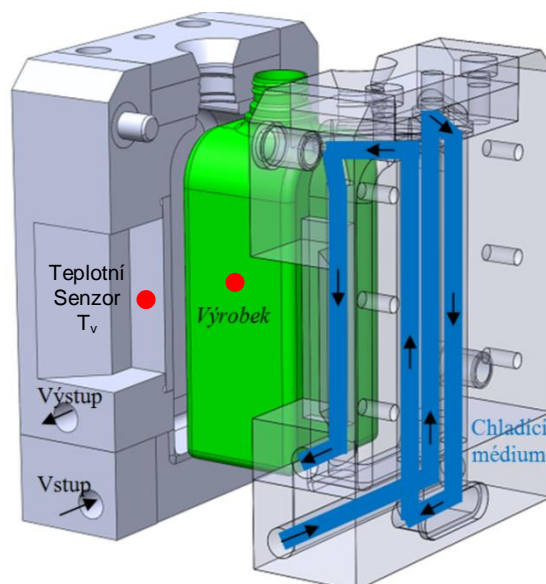


Obr. 71 Schéma časového nastavení procesu injektáže

Posouzení efektivity chlazení testovaných variací injektáže CO₂ bylo opět provedeno pomocí termovizních snímků pořízených termo kamerou FLIR 660. Po ustálení náběhu procesu byly produkty ihned po jejich odformování dvacátého kusu odebírány, ustavovány a snímány v předem zvolených pozicích, viz obrázek 72. Ze snímků byly následně vyhodnoceny (softwar ThermaCAMTM Researcher TM 2.9) průměrné hodnoty teplotních polí, jejich minimální a maximální teploty, a také konkrétní hodnoty teplot ve zvolených bodech T_{p1} , T_{p2} , T_{p3} . Za účelem detekce chladících průběhů bylo dále do tvarové části vyfukovací formy integrováno teplotní čidlo KISTLER 6189A připojené do měřící jednotky KISTLER 2869. Teplotní čidlo bylo vzhledem ke konstrukčnímu řešení formy, obrázek 73, umístěno do středové části formy.



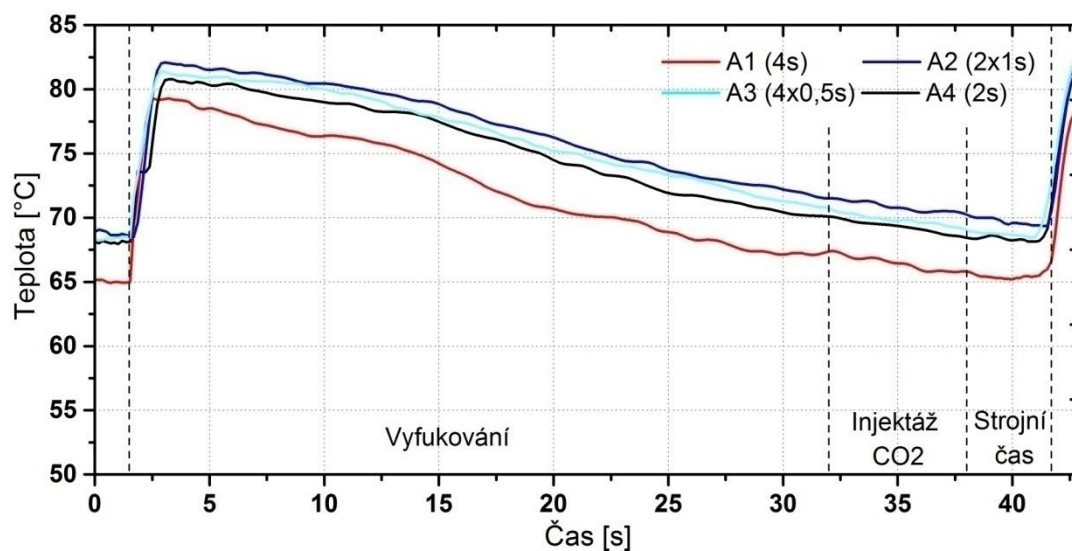
Obr. 72 Vyhodnocované teplotní pole v jednotlivých snímaných pozicích



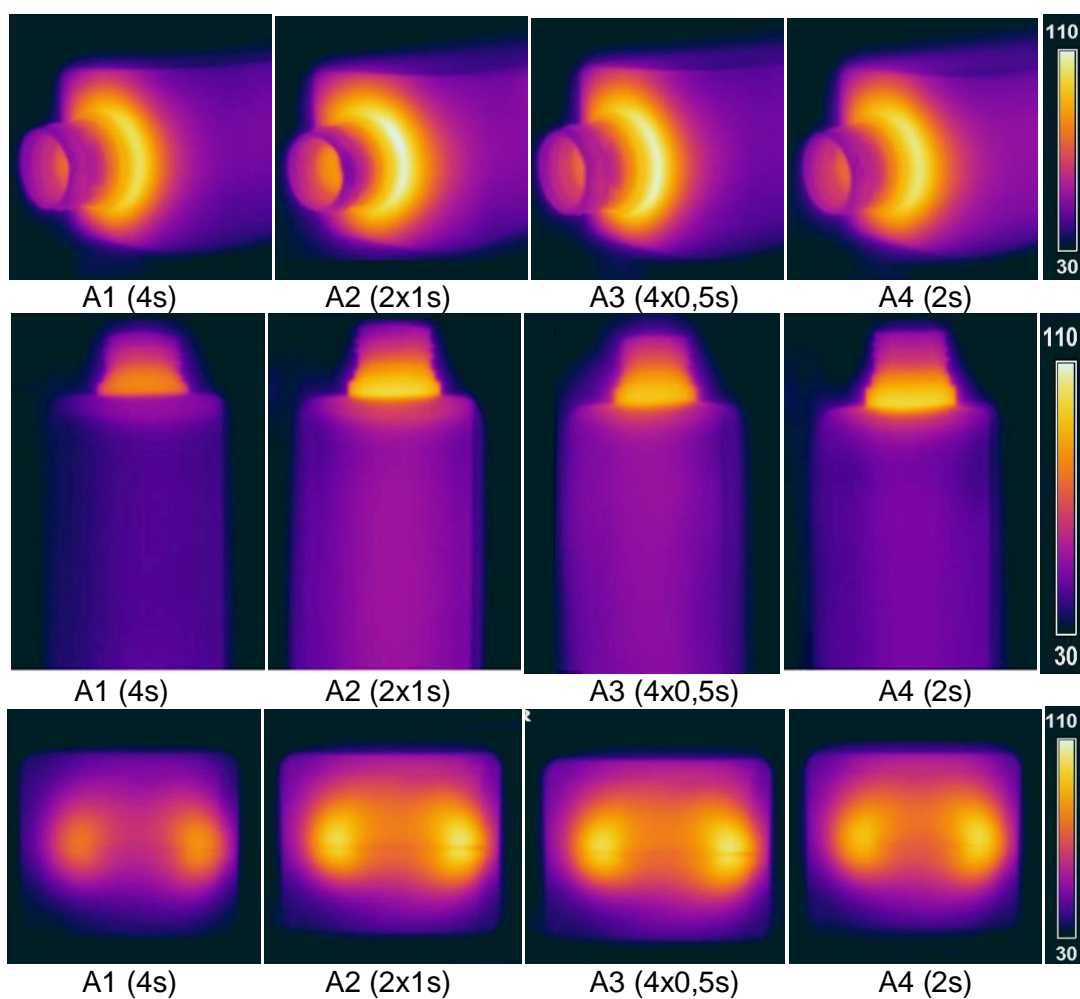
Obr. 73 Umístění teplotního senzoru do vnitřní dutiny formy

Výsledky experimentálního měření jsou představeny v následujících odstavcích. K nalezení optimálního nastavení procesu injektáže bylo využito stejného schématu jako při hodnocení separovaného interního systému, tzn. rozdělení výsledků do tří hlavních skupin A, B, C. V každé skupině byly vzájemně porovnány teplotní průběhy senzoru umístěného ve tvarové části formy a teplotní distribuce produktů odformovaných produktů (termovizní snímky).

Chladicí varianta injektáže A



Obr. 74 Teplotní průběhy senzoru umístěného v tvarové části formy - varianta A



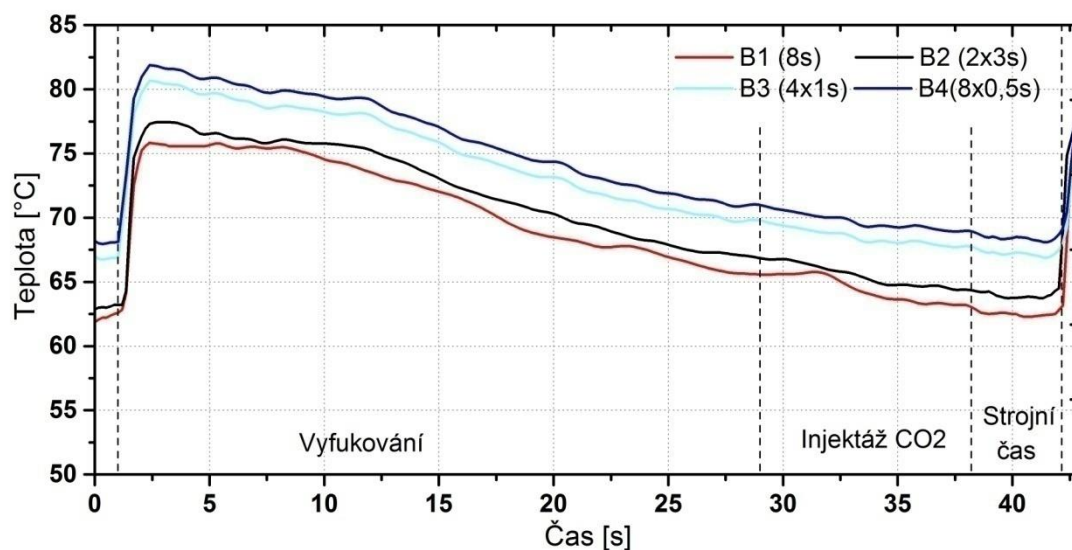
Obr. 75 Termovizní snímky odformovaných produktů – varianta chlazení A

Obrázek 74 prezentuje dosažené teplotní průběhy senzoru (T_v) umístěného do tvarové části vyfukovací formy testovaných variací injektáže A1, A2, A3, A4 v časovém okamžiku odpovídajícímu dvacátému pracovnímu cyklu. Ze zaznamenaných dat je patrný prudký nárůst teploty v počáteční fázi vyfukování, fázi tvarování (dotyk parizonu se stěnou formy). V okamžiku dosažení maxima je výrobek již zcela vytvarován a tlak přitlačující stěnu produktu ke kavitě formy zajišťuje intenzivní redukci teploty, která pokračuje i ve fázi injektáže CO₂. Ze zobrazených průběhů je evidentní rozdíl mezi variantou A1 a dalšími způsoby dávkování A2, A3, A4. Kontinuální injektáž, v důsledku výhodnějších tlakových průběhů a vyššího použitého množství CO₂, zapříčiňuje ustálení teplotních průběhů na nižších hodnotách. Ze zaznamenaných teplotních průběhů variant injektáže, která přivádí do vnitřních částí produktu stejné množství chladicího média v rozdílných časových periodách, není možné vzhledem k jejich velmi malým rozdílům vyvodit obecné závěry. Příčinu je nutno hledat, stejně tak jako v případě separovaného interního systému, v použití velmi malého množství CO₂, které nemá na chlazený objem výrazný efekt, a proto se rozdíly ve variacích injektáže nemohou plně projevit. Vyhodnocené termovizní snímky, představené na obrázku 75, potvrzují výše uvedené předpoklady. Nejvyšší chladicí efekt a nejnižší teploty produktu byly zaznamenány při kontinuální injektáži (A1). Z vyhodnocených parametrů (minimální, maximální a průměrná teplota) chladících variant A2, A3, A4, tabulka 13, nelze vzhledem k velmi malým rozdílům vyvodit žádné závěry.

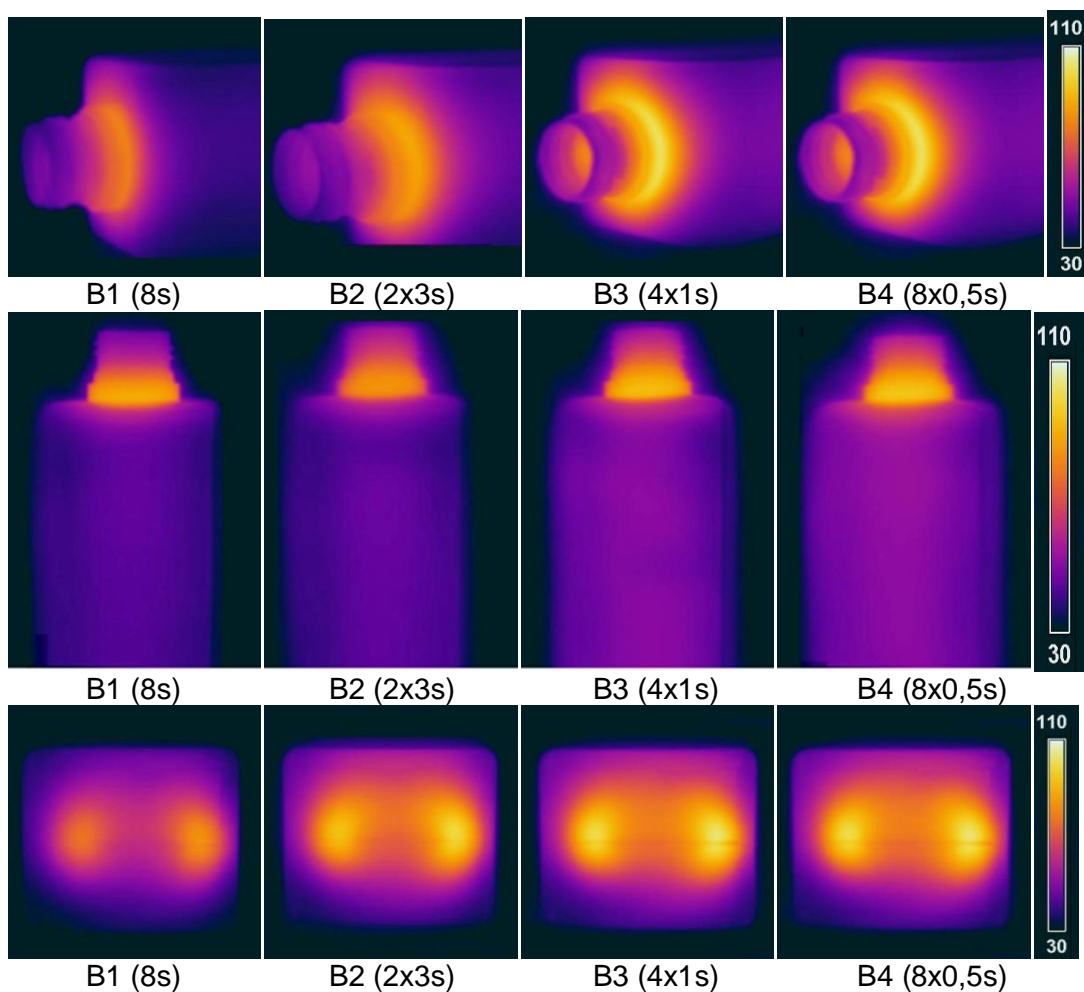
Tab. 13 Vyhodnocen parametry z termovizních snímků – chladící varianta A

	A1 (4s)	A2 (2x1s)	A3 (4x0,5s)	A4 (2s)
T_{p1} [°C]	65,9	71,9	70,1	68,8
T_{p2} [°C]	49,7	57,8	55,4	54,9
T_{p3} [°C]	57,8	62,9	61,7	60,8
HRDLO				
MIN [°C]	36,9	38,3	36,2	37,7
MAX [°C]	103,7	109,8	109,1	109,5
PRŮM [°C]	69	72,5	71,8	72,0
ČELO				
MIN [°C]	34,7	36,2	35,7	35,4
MAX [°C]	84,7	100,6	101,2	100,1
PRŮM [°C]	44,7	54,4	53,6	52,9
DNO				
MIN [°C]	31,8	36,3	36,4	35,8
MAX [°C]	100,6	110,4	109,3	108,6
PRŮM [°C]	67,2	75,9	75,1	73,6

Chladicí varianta injektáže B



Obr. 76 Teplotní průběhy senzoru umístěného v tvarové části formy - varianta B



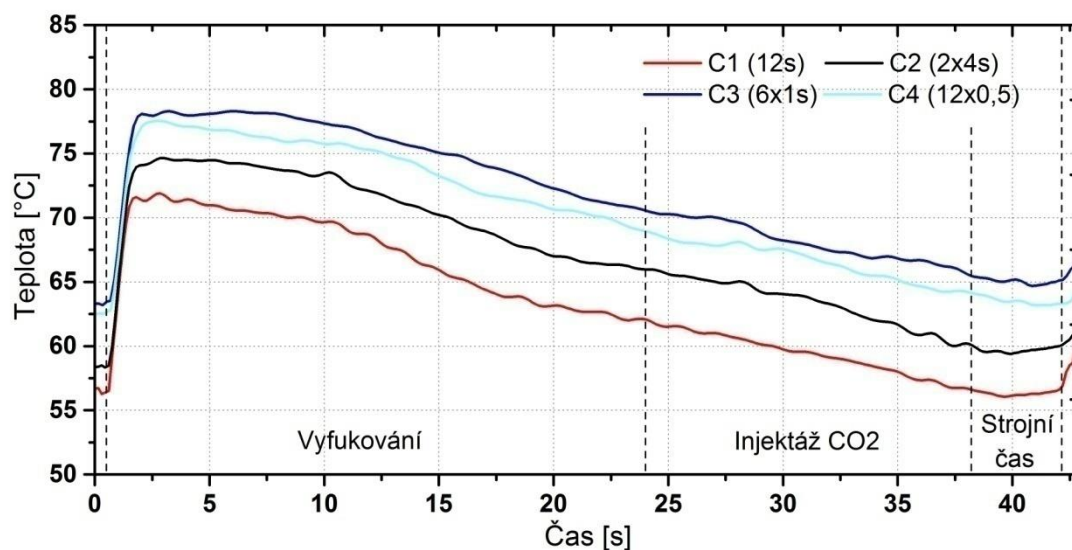
Obr. 77 Termovizní snímky odformovaných produktů – varianta chlazení B

Z teplotních průběhů (obrázek 76) senzoru umístěného v tvarové dutině je patrný nárůst diferencí mezi interními chladicími variantami, které do dutiny produktu dávkují stejné množství média v rozdílných periodách (B3, B4). Vyššího chladicího efektu, ustálení teplotních průběhů na nižších hodnotách bylo docíleno v důsledku výhodnějších teplotně tlakových průběhů interního média při aplikaci vyššího počtu dávek s kratší prodlevou mezi injektážemi body. Přerušení dodávky způsobuje pokles obou procesních parametrů expandujícího CO₂ - teploty i tlaku, což zapříčiňuje pokles chladicího efektu interního i externího temperačního systému. Na obrázku 77 jsou představeny termovizní snímky odformovaných produktů. Z vyhodnocených parametrů (tabulka 14) je evidentní, že nejvyššího chladicího efektu bylo dosaženo při osmisekundovém nepřetržitém dávkování. Jednosekundové přerušení kontinuální injektáže způsobilo nárůst průměrné teploty produktu přibližně o 5 °C (v oblasti dna o 10 °C), a tedy pokles efektivity chlazení. Jednosekundová periodicitu mezi injektážemi a prodlevou pak způsobila další snížení efektivity chlazení, nárůst průměrné teploty přibližně o 10 °C (v oblasti dna o 15 °C). Vyhodnocené parametry termovizních snímků testovaných variant, jež aplikují stejné množství oxidu uhličitého (B3, B4), již vykazují vyšší teplotní difference než v přecházejících experimentálních měřeních (A2, A3, A4). Nicméně ani zde se nejedná o výrazný rozdíl.

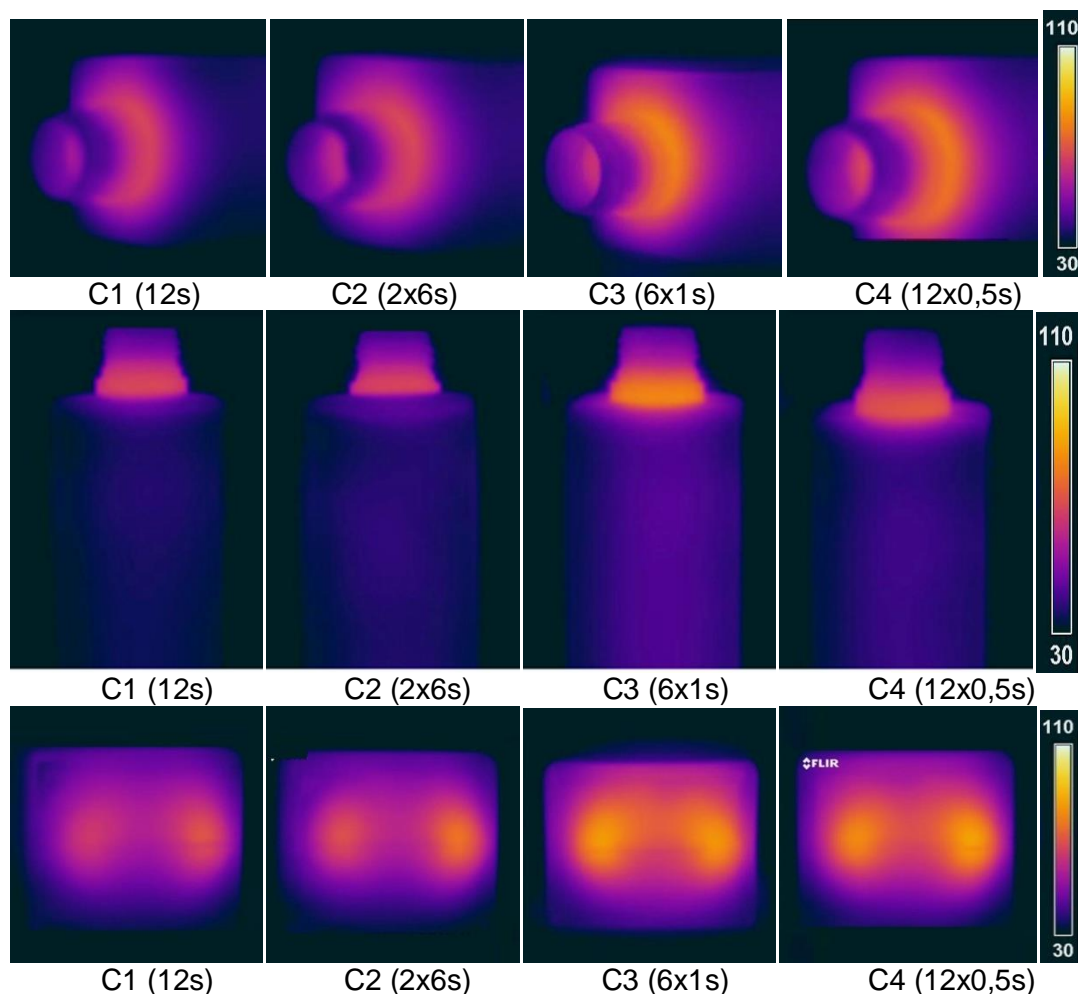
Tab. 14 Vyhodnocen parametry z termovizních snímků – chladicí varianta B

	B1 (8s)	B2 (2x3s)	B3 (4x1s)	B4 (12x0,5)
T _{p1} [°C]	55,7	57,4	68,4	66,7
T _{p2} [°C]	45,3	47,2	53,6	52,0
T _{p3} [°C]	44,9	50,1	57,7	55,6
HRDLO				
MIN [°C]	33,7	33,5	35,3	34,1
MAX [°C]	84	90,8	103,5	102,3
PRŮM [°C]	54,2	60,2	70,6	67,3
ČELO				
MIN [°C]	34	34,6	40,7	39,3
MAX [°C]	91,4	87,4	96,9	95,0
PRŮM [°C]	43,1	47,4	54,8	53,0
DNO				
MIN [°C]	30,9	34,4	35,1	32,1
MAX [°C]	87,2	101,2	105,6	104,4
PRŮM [°C]	53,7	65,6	70,6	67,3

Chladicí varianta injektáže C



Obr. 78 Teplotní průběhy senzoru umístěného v tvarové části formy - varianta C



Obr. 79 Termovizní snímky odformovaných produktů – varianta chlazení C

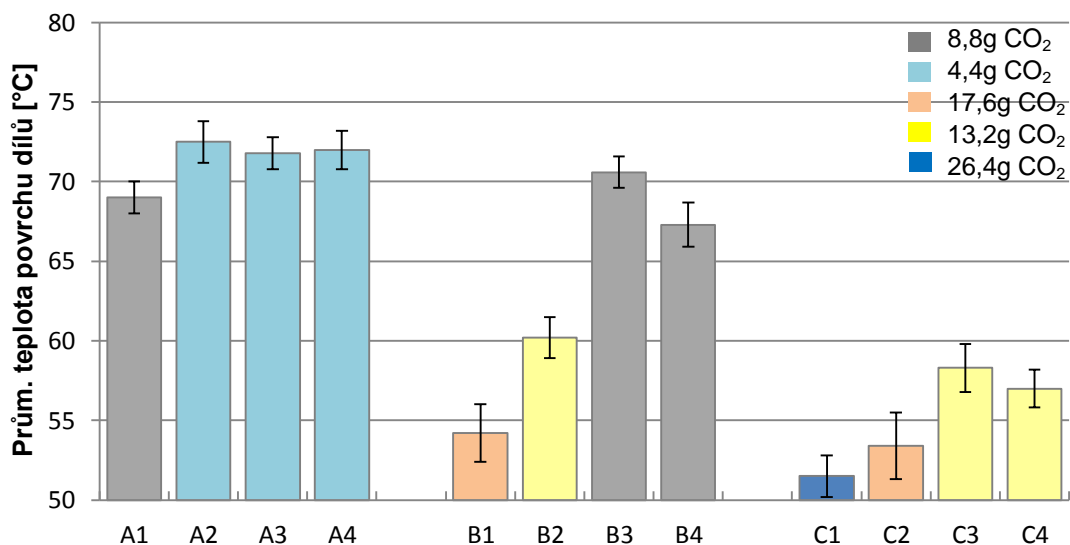
Vzhledem k množství použitého CO₂ by posouzení optimálního způsobu dávkování CO₂ mělo být z testovaných variant nejmarkantnější právě u varianty C. Tento předpoklad lze vzhledem k detekovaným teplotním průběhům (obr. 78) a vyhodnoceným snímkům potvrdit (tab. 15). Obdobně jako v přecházejících případech byl nejvyšší chladicí efekt zaznamenán při kontinuálním způsobu dávkování. Prodleva injektáže v délce dvou sekund způsobila výrazný pokles chladicího efektu. Dle předpokladů dosažené difference efektivity chlazení chladících variant, jež aplikují stejné množství chladiva, jsou v tomto případě výraznější.

Tab. 15 Vyhodnocené parametry z termovizních snímků – chladicí varianta C

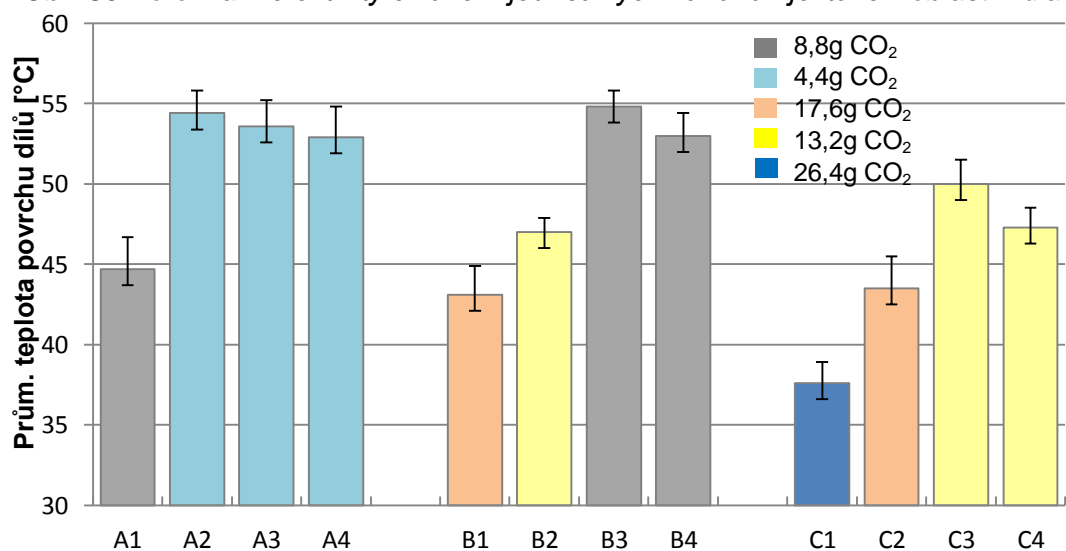
	C1 (12s)	C2 (2x4s)	C3 (6x1s)	C4 (12x0,5s)
T _{p1} [°C]	42,6	46,9	57,1	55,5
T _{p2} [°C]	35,9	38,8	44,5	42,2
T _{p3} [°C]	45,1	49,6	52,6	51,4
HRDLO				
MIN [°C]	31,5	32,3	33,9	33,2
MAX [°C]	72,1	72,7	84,2	82,4
PRŮM [°C]	51,5	53,4	58,3	57,0
ČELO				
MIN [°C]	30,9	31,9	32,8	32,2
MAX [°C]	72,3	71,6	82,4	80,1
PRŮM [°C]	37,6	43,5	50,0	47,3
DNO				
MIN [°C]	29,1	31,9	34,2	33,9
MAX [°C]	74	80,9	89,7	88,3
PRŮM [°C]	50,8	55,0	63,6	60,0

Vzájemné srovnání jednotlivých variant injektáže

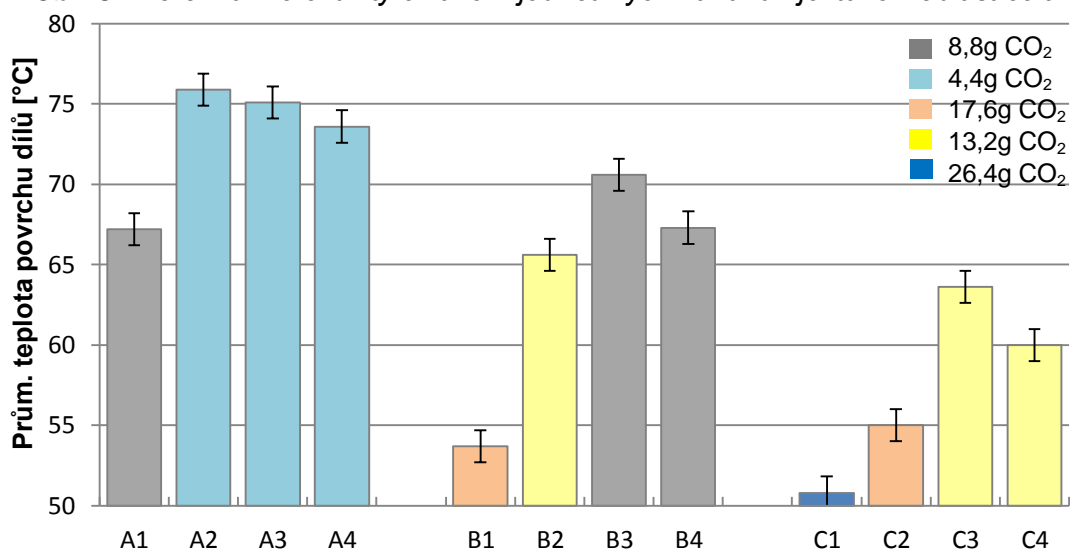
Pro vzájemné porovnání všech testovaných variací injektáže jsou dosahované efektivity chlazení, stanovené z průměrných teplot povrchu odformovaných produktů, srovnány (stejně jako v přecházejícím případě, kap. 5.3.1) dle vyhodnocovaných lokací na obrázcích 80 až 82. Ze zobrazených výsledků je zřejmé, že přerušení dodávky CO₂ způsobuje pokles obou procesních parametrů chladicího média - teploty i tlaku, což zapříčiňuje pokles chladicího efektu interního i externího temperačního systému. S rostoucí délkou prodlev injektáže se dosahované difference zvyšují. Z dosažených výsledků lze také konstatovat, že význam tohoto tvrzení roste s množstvím použitého média, kde nejvyšší difference v injektážních variacích byly zjištěny při chladicí variantě C. Dosažené výsledky zcela korespondují se závěry a predikcemi testování optimálního způsobu dávkování separovaného interního systému. Z hlediska maximálního chladicího efektu se porto jeví jako technologicky nejvýhodnější aplikace nepřetržité injektáže.



Obr. 80 Porovnání efektivity chlazení jednotlivých variant injektáže - oblast hrdla



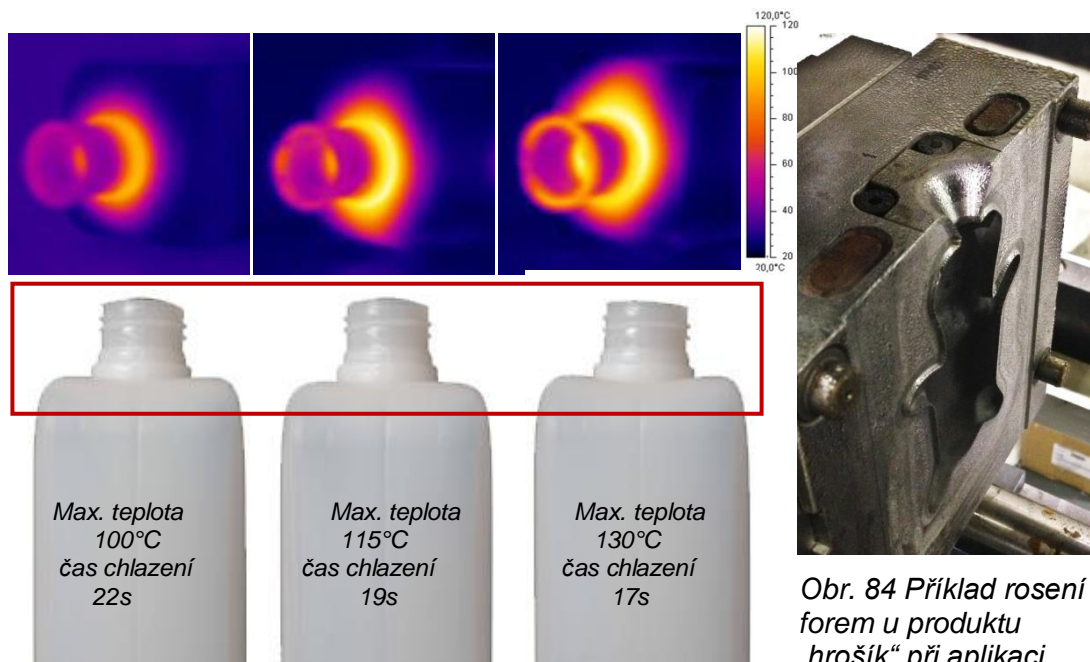
Obr. 81 Porovnání efektivity chlazení jednotlivých variant injektáže - oblast čela



Obr. 82 Porovnání efektivity chlazení jednotlivých variant injektáže – oblast dna

5.4 Experimentální stanovení účinnosti chlazení CO₂ temperačního systému

Po volbě testovaných výrobků a jejich materiálu, připojení CO₂ temperační jednotky společnosti Linde a.s. do interního rozhraní vyfukovacího stroje, experimentálním stanovení optimálního způsobu dávkování bylo dalším úkolem stanovení účinnosti chlazení. Za účelem detekce chladících charakteristik injektovaného oxidu uhličitého bylo také zde využito separace interního chladicího systému a až posléze bylo provedeno stanovení celkového navýšení účinnosti chlazení vyfukovacího procesu, tedy součinnost externího a interního temperačního systému. Jelikož je cílem práce verifikace využitelnosti chladicího potenciálu oxidu uhličitého pro produkci tvarově i rozměrově odlišných produktů, jejichž časy výroby, a tedy i periody chlazení jsou diametrálně odlišné, bylo velmi důležitou otázkou správné nastavení délky injektáže chladicího média. Pro vzájemné porovnání dosažených výsledků efektivit chlazení byly zvoleny tři varianty kontinuálního dávkování A, B, C, jejichž periody injektáže vždy korespondovaly s 20 %, 40 % a 60 % celkové doby chlazení výrobního cyklu jednotlivých produkcí. Dalším nesmírně důležitým úkolem bylo nalezení optimálního nastavení výroby. Optimální pro výrobce znamená dosažení maximální produktivity bez vzniku zmetků. V produkci polymerních materiálů lze za hranici vymezující rychlost produkce a zároveň její kvalitu považovat teplotu odformování produktů. Pro námi použitý materiál (Liten BB29) je tato hranice 80 °C, dle doporučení materiálového listu. Po konzultaci s řadou producentů bylo zjištěno, že je uvedená hodnota v technické praxi často překračována, nicméně neměla by výrazně přesáhnout 100 °C. Uvedené tvrzení bylo experimentálně ověřeno na produkci 0,3 litrové lahvičky, kde výrazné převýšení stoupňové teploty odformování vedlo, vlivem nedostatečného času chlazení, k tvorbě deformací v oblasti krčku, viz obrázek 83. Proto bylo optimální nastavení výroby stanoveno s ohledem na tuto hraniční hodnotu, samozřejmě za současného sledování a hodnocení kvality produktů. Výsledky nalezení optimálního nastavení jsou uvedeny v tabulce 16. Vzhledem k představenému výrobnímu optimu je vhodné upozornit, že teplota cirkulujícího média (vody) byla cíleně volena u všech testovaných produkcí 6 °C. Jedná se o nejnižší možnou použitelnou teplotu (dle výrobních podmínek, duben 2013), která nezpůsobila v důsledku rosení forem produkci zmetků. Dosažené výsledky jsou tedy skutečně výrobními maximy dané produkce, které nelze běžnými způsoby (nastavení procesních parametrů) více redukovat. Teplota extrudovaného parizonu vycházejícího z vytlačovací hlavy byla pro všechna experimentální měření nastavena na 190 °C, což udělalo hodnocení účinnosti více transparentní.



Obr. 83 Deformace krčku v závislosti na teplotě
Odformovaných produktu

Obr. 84 Příklad rosení
forem u produktu
„hrošík“ při aplikaci
nízkých teplot

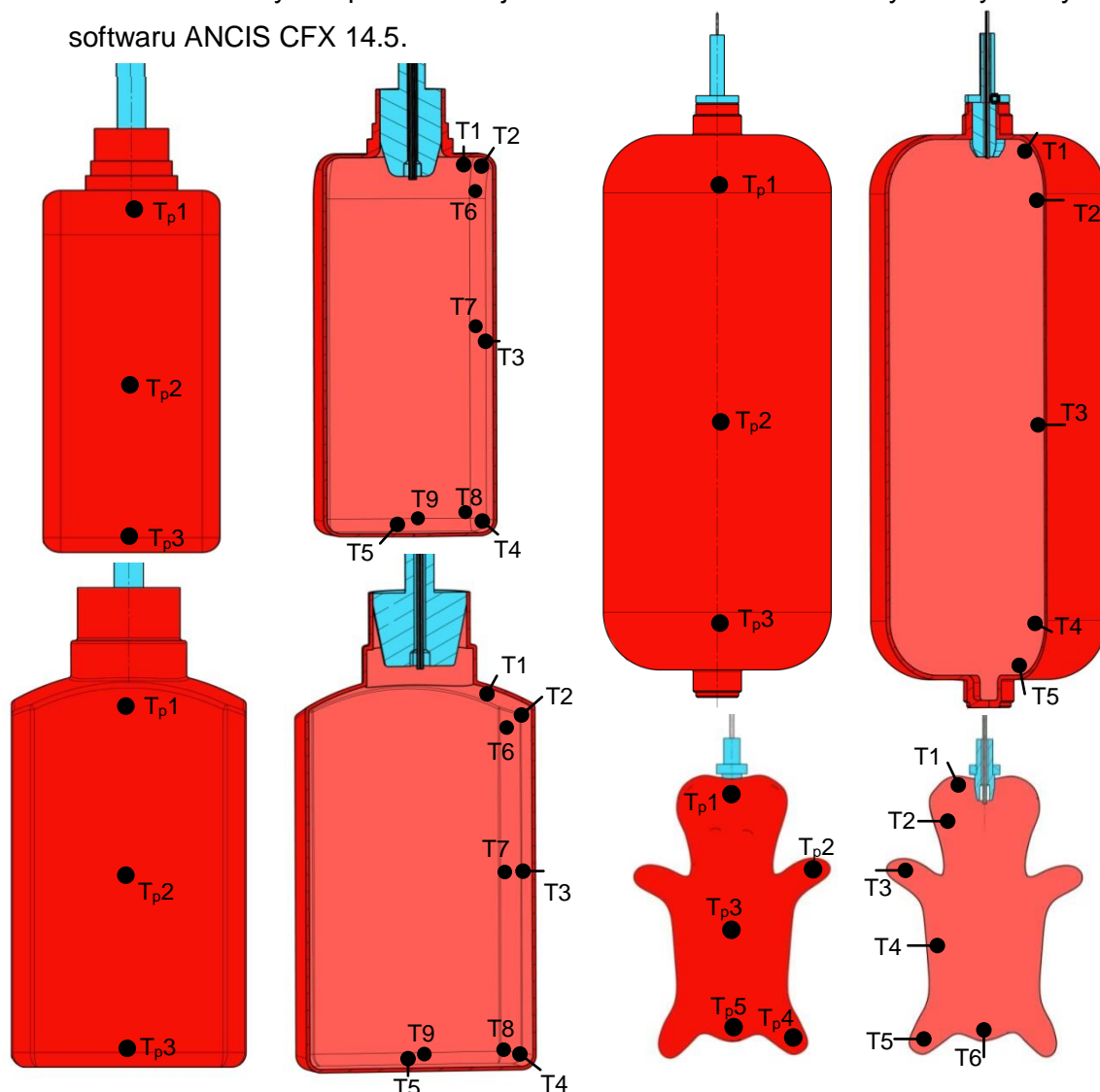
Tab. 16 Nalezené výrobní optimum testovaných produkcí společně s procesními
parametry jednotlivých chladících variant

Produkt	Strojní čas	Čas chlazení	Čas cyklu	Chladicí variant A		Chladicí variant B		Chladicí variant C	
				čas	množství	čas	množství	čas	množství
30ml	4,5s	10s	16s	2s	2,2g	4s	8,4g	6s	13,2g
0,3l	4,5s	14s	21s	2,8s	13,4g	5,6s	27,1g	8,4s	40,6g
0,5l	4s	16s	22s	3,2s	16,1g	6,4s	32,1g	9,6s	48,21g
7l	10s	80s	95s	16s	71,9g	32s	143,8g	48s	228,4g

Před představením výsledků experimentálních měření je ještě nutné poznamenat, že nejprve byla experimentální měření a produkce testována při použití jedné kapiláry přivádějící CO₂. Aplikace jedné kapiláry však zajišťovala zejména pro produkty vyšších objemů (7 l; 0,5 l) dosažení velmi malých chladících efektů. Proto bylo přiváděné množství CO₂ při produkci 7 l, 0,5 l, 0,3 l výrobků zvětšeno přidáním další kapiláry. Geometrie kalibračního trnu nejmenšího výrobku („Hrošíka“) neumožnila tuto alternativu. Za účelem interního chlazení tak bylo využito pouze jedné kapiláry. Množství (poměrové) přiváděného média bylo proto poloviční než v ostatních případech.

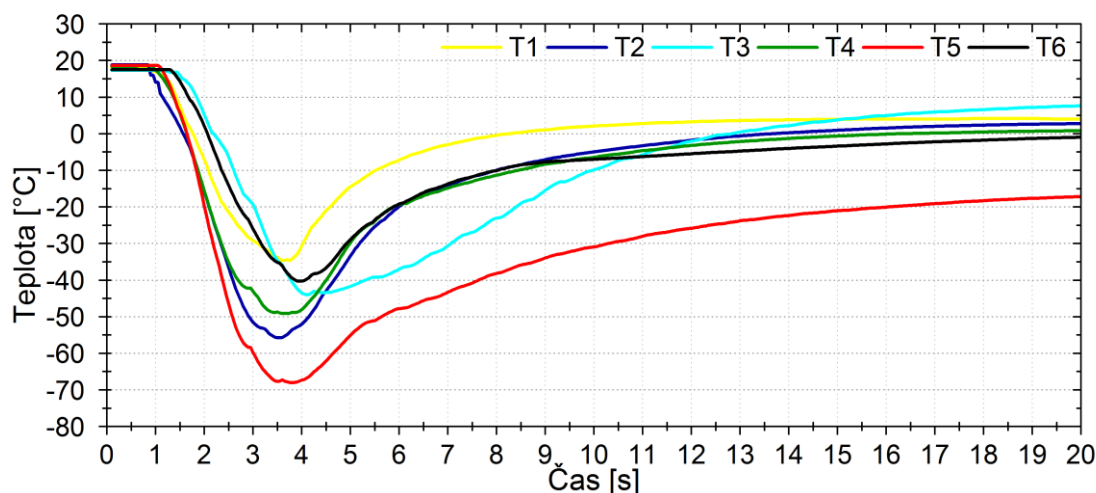
5.4.1 Stanovení chladících charakteristik injektovaného CO₂

Pro zjištění chladících charakteristik injektovaného oxidu uhličitého, aplikovaného jako interní chladicí médium v tvarově i objemově rozdílných produktech, bylo s výhodou využito sestaveného přípravku představeného v kapitole 5.3.1. Tento přípravek umožňuje fixaci produktu ve stejné pozici s procesní pozicí a zajišťuje minimální ovlivnění procesu interního chlazení (separace interního chlazení). Měřenými charakteristikami byly opět interní teplotní průběhy získané integrací opláštěných Ni-Cr termočlánků (typ K) do vnitřního rozhraní produktů a s využitím termokamery FLIR 660 také distribuce teplotního pole povrchu produktů. Pozice implementovaných teplotních senzorů společně s hodnocenými body vnějších (povrchových) teplot dílů jsou uvedeny na obrázku 85. Kromě výše uvedených experimentálních měření byla dále, za účelem detekce proudění expandujícího média v tvarově i objemově rozdílných produktech, provedena simulační analýza procesu injektáže. Pro simulační analýzu bylo využito softwaru ANCIS CFX 14.5.



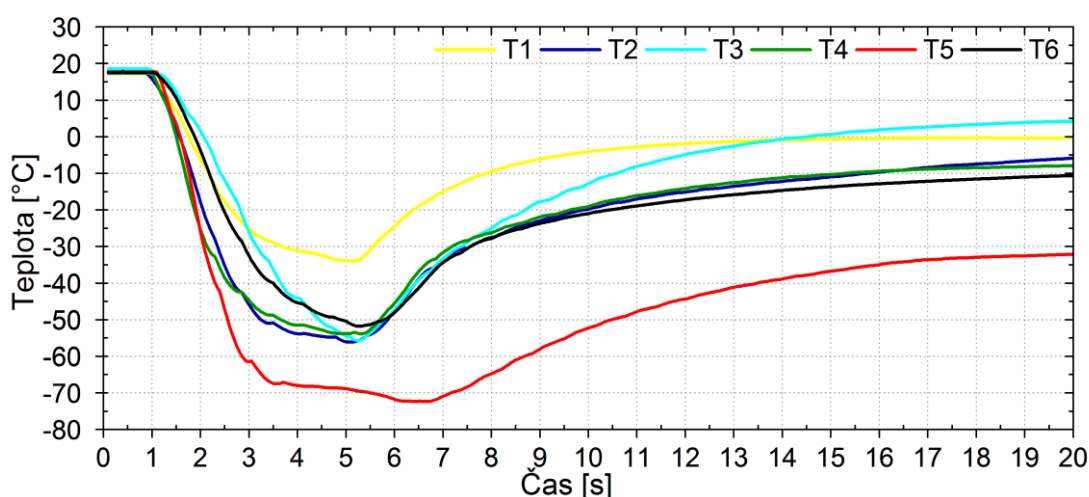
Obr. 85 Pozice interních teplotních senzorů a hodnocené body vnějšího povrchu

Teplotní průběhy interního prostředí 30 ml produktu „Hrošík“



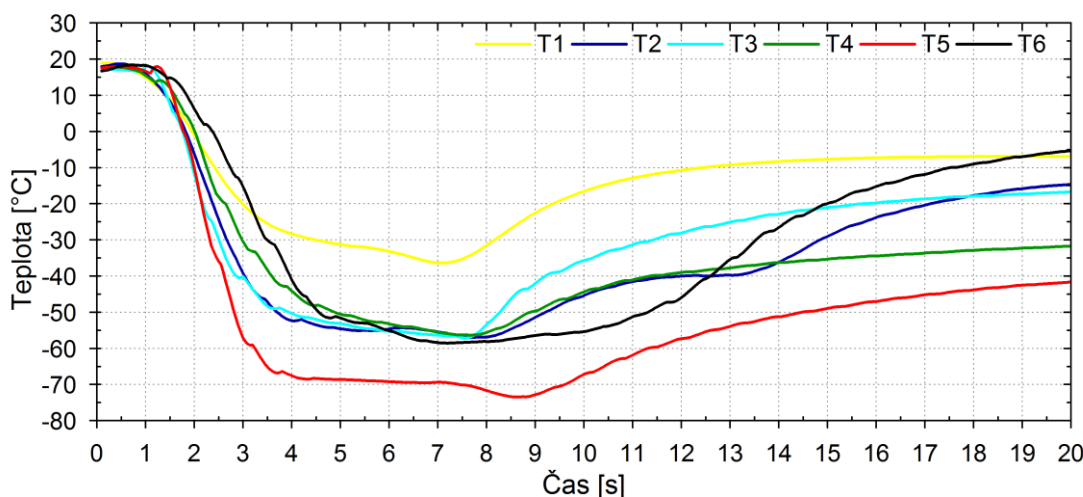
Obr. 86 Teplotní průběhy interního prostředí produktu „Hrošík“ – varianta A

Ze zaznamenaných interních teplotních průběhů injektáže CO₂ v periodě odpovídající 20 % celkové doby chlazení výrobního optima (maxima) 30 ml produktu (obrázek 86) je evidentní výrazný pokles interní teploty. Nejnižší teploty jsou evidovány termočlánky T5, T6, které jsou umístěny v zadních končetinách a dnu produktu. Ze zaznamenaných dat je také patrné, že interní teplota v dalších pozorovaných lokacích umístěných po obvodu produktu klesala směrem k injektážnímu místu. Z této závislosti lze vyvodit závěr, že expandující médium primárně dopadá do spodních lokací produktu, kde také předá největší část své tepelné energie.



Obr. 87 Teplotní průběhy interního prostředí produktu „Hrošík“ – varianta B

Také v průbězích interních teplot při aplikaci chladicí varianty B (obrázek 87), dvojnásobná délka injektáže, jsou evidovány nejnižší teploty v oblasti zadních končetin produktu. Hodnoty interních teplot klesaly směrem k injektážnímu místu. Delší perioda přívodu média a s ní spojené množství však na konci fáze injektáže zapříčinily dosažení srovnatelných hodnot interních teplot ve všech oblastech, vyjma zadních končetin (T5) a oblasti hrdla (T1).



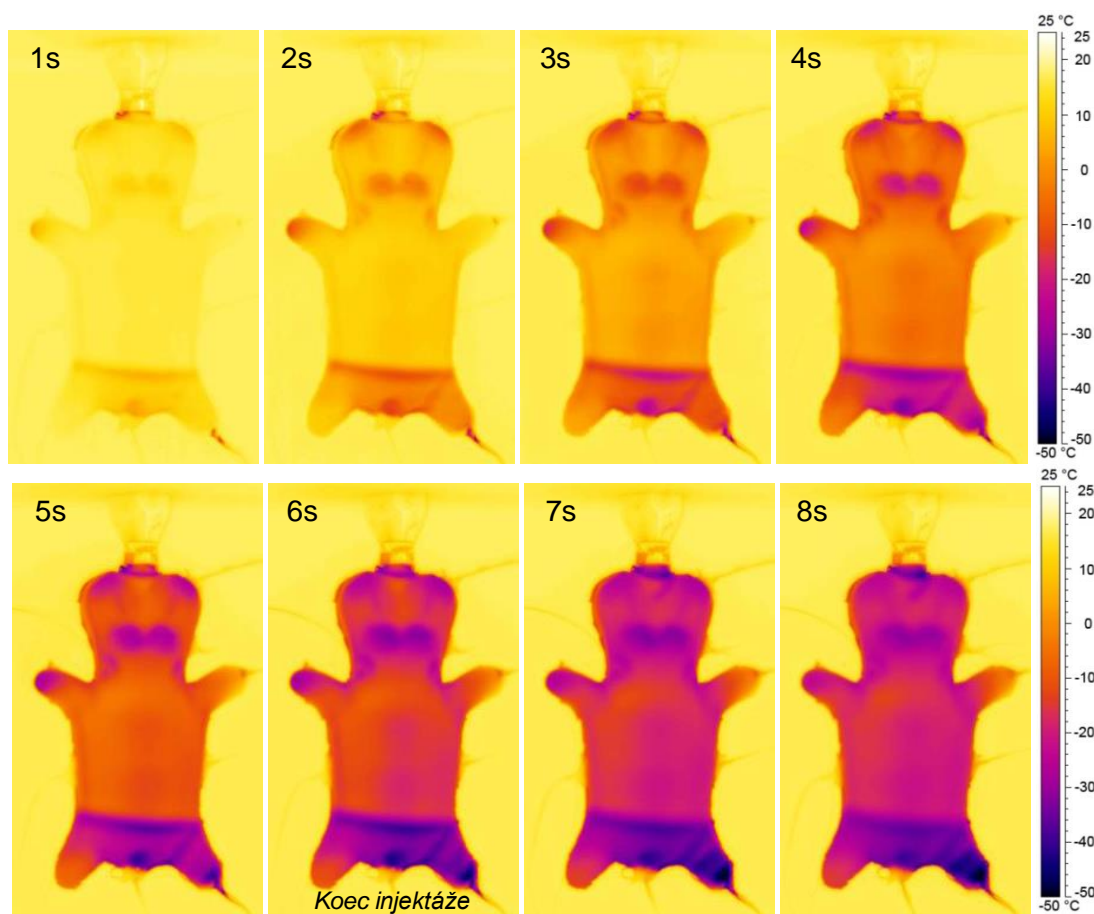
Obr. 88 Teplotní průběhy interního prostředí produktu „Hrošík“ – varianta C

Při chladicí variantě dávkování CO₂, korespondující 60 % celkové doby chlazení (obrázek 88), docházelo přibližně po třech sekundách injektáže k výraznému zlomu v poklesu interních teplot, které se s rostoucím časem stávaly téměř konstantní. Ze zaznamenaných teplotních průběhů je také evidentní, že ani další zvýšení množství chladicího média nezapříčinilo dosažení rovnoměrných teplot ve všech interních lokacích. V oblastech zadních končetin se teploty CO₂ blížily teoretickému maximu (-78 °C), a proto lze předpokládat nejvyšší ochlazovací efekt právě v těchto prostorách produktu. Konkrétní minimální dosahované teploty všech chladicích variant jsou představeny v tabulce 17.

Tab. 17 Minimální dosahované teploty jednotlivých variant chlazení – „Hrošík“

Varianta chlazení	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T6 [°C]
A (1,9s)	-34,7	-56,3	-44,4	-48,8	-67,5	-40,3
B (3,8s)	-37,7	-57,7	-55,0	-54,3	-72,8	-50,3
C (5,7s)	-37,1	-57,5	-64,5	-56,3	-74,5	-57,8

Teplotní distribuce vnějšího povrchu 30ml produktu „Hrošík“



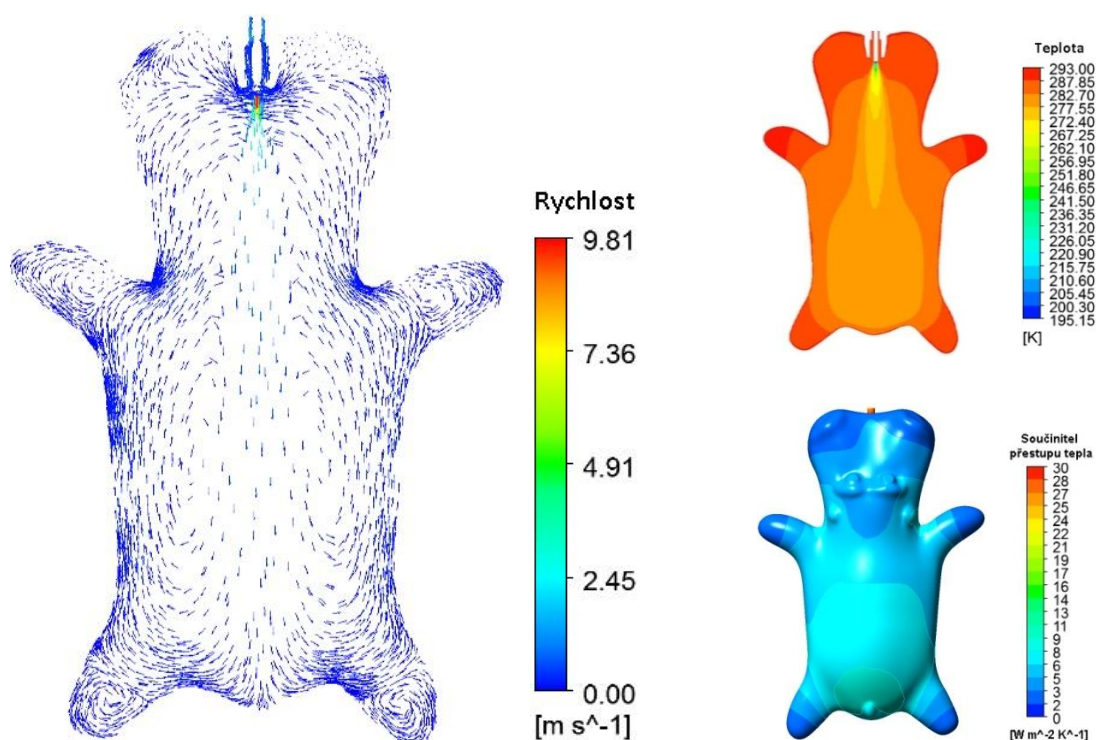
Obr. 89 Teplotní distribuce vnějšího povrchu „Hrošíka“ během injektáže CO₂

Na obrázku 89 je v jednosekundových intervalech znázorněn ochlazovací efekt injektovaného CO₂. Nejnižší teplotní průběhy interního chladicího média byly detekovány v jeho zadních končetinách, což také dle předpokladu evokovalo tvorbu teplotního minima vnějšího povrchu v těchto lokacích. Z distribucí povrchových teplot produktu lze také vyčíst, že se zvyšujícím se množstvím chladicího média docházelo ke zrovnoměrnění teplotních distribucí ostatních partií produktu. Dále bylo zjištěno, že chladicí účinek, zejména v obou končetinách produktu, není souměrný. Příčinou je způsob implementace kapiláry, která není fixována v ústí kalibračního trnu. Během procesní fáze tak může snadno dojít k jejímu vychýlení, a tedy následnému nerovnoměrnému chlazení. Z termovizních snímků byly stanoveny konkrétní teploty zvolených bodů, stejně tak jako minimální, maximální a průměrné hodnoty teplotního pole. Výsledky jsou prezentovány v tabulce 18.

Tab. 18 Vyhodnocené parametry vnějšího teplotního pole produktu „Hrošík“

Čas	1 s	2 s	3 s	4 s	5 s	6 s	7 s	8 s
T _{p1} [°C]	11,3	-0,8	-9,0	-15,6	-20,7	-24,8	-25,3	-24,2
T _{p2} [°C]	16,5	12,2	7,5	3,0	-1,4	-5,6	-7,0	-6,7
T _{p3} [°C]	16,0	9,8	2,7	-4,1	-10,1	-15,7	-18,8	-19,6
T _{p4} [°C]	4,1	-12,5	-23,4	-32,3	-38,6	-41,6	-39,9	-38,8
T _{p5} [°C]	12,4	-0,9	-11,9	-25	-32,4	-38,8	-43,8	-45,4
Min [°C]	-14,1	-22,7	-29,8	-34,3	-40,3	-45,9	-49,7	-50
Max [°C]	17,5	17,4	17,0	16,4	16,0	16,0	16,2	16,3
PRŮM	14,5	6,9	-0,4	-7,1	-13	-17,9	-20,4	-21

Simulace proudění 30ml produktu „Hrošík“

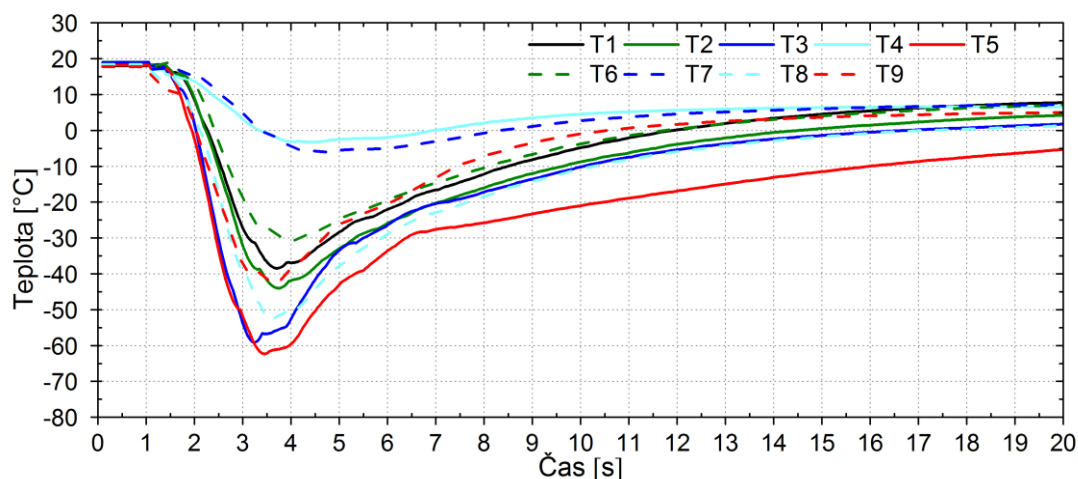


Obr. 90 Výsledky simulace proudění tvarově komplikovaného produktu – „Hrošíka“

Dosažené výsledky simulace proudění nejmenšího z testovaných produktů „Hrošíka“ v časovém okamžiku odpovídajícímu ustálenému stavu (2,2 s) jsou prezentovány na obrázku 90. Současné dostupné simulační softwary neumožňují aplikaci kombinace vícefázových směsí - pevná a plynná fáze CO₂. Proto byla provedena simulační analýza proudění pouze plynné fáze (matematický model RNG K-ε), která vymezuje charakter proudění expandující směsi, a je tedy pro detekci proudění CO₂ ve vnitřních prostorech vyfukovaných produktů zcela dostačující. Ze zobrazených charakteristik proudění je zřejmé, že chladící médium v produktu vytváří proud směřující od vstupní části středem produktu do spodní části, kde dochází k jeho usměrnění (odrazem od dna produktu), jež způsobuje

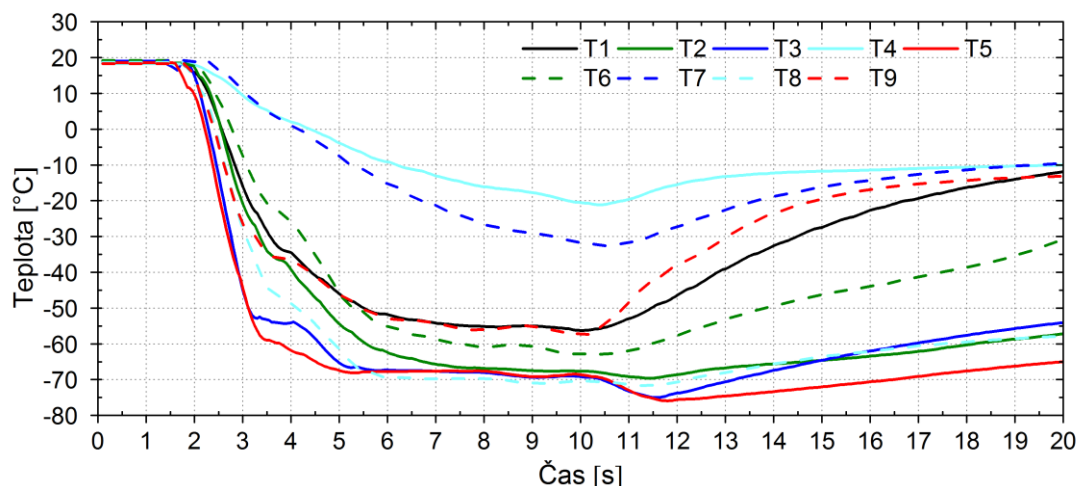
následnou cirkulaci média podél stěn produktu až do místa jeho odvodu. Výsledky simulace proudění tedy potvrzují výše uvedené experimentálně stanovené poznatky o dosažení nejvyšší efektivity interního chlazení ve spodních částech produktů, jelikož expandující médium dopadá primárně do spodních lokací produktu, kde také předává nejvyšší část své tepelné energie. Kromě charakteristik proudění jsou na obrázku 90 dále představeny vyhodnocené výsledky teplotní distribuce interního chladicího média a součinitel přestupu tepla (rozhraní interní prostředí/ stěna produktu) odpovídající časovému okamžiku ustálení proudění. Vzhledem k tomu, že provedená simulační analýza nepočítá se změnou fáze, nýbrž s prouděním plynného média o teplotě -78 °C, je nutno tyto výsledky brát pouze jako výsledky informativního charakteru.

Teplotní průběhy interního prostředí 0,3l produktu „lahev“

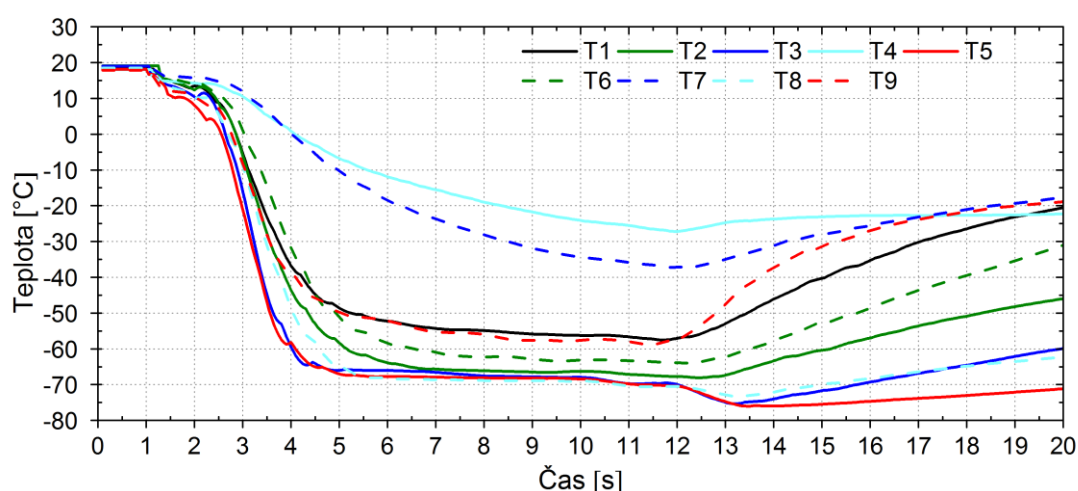


Obr. 91 Teplotní průběhy interního prostředí 0,3l „lahvičky“ – varianta A

Obrázek 91 představuje dosahované teplotní průběhy senzorů umístěných po obvodu 0,3 l produktu při 2,8 sekundové kontinuální injektáži (chladicí varianta A). Ze znázorněných závislostí je zřejmý okamžitý výrazný pokles interní teploty ve spodních částech produktu. Stejně jako při chladicí variantě A 30 ml produktu hodnoty minimální dosažené interní teploty, a tedy i předpokládaný chladicí efekt, klesají po obvodu vnitřní stěny produktu směrem ke kalibračnímu trnu. Zajímavou závislost vykazují teplotní senzory umístěné na hranách lahvičky (v grafu znázorněné přerušovanou čarou). Jsou-li porovnány dosahované teploty ve stejných úrovních, v oblastech hran jsou evidovány jednoznačně nižší hodnoty. Příčinu je nutno hledat v nerovnoměrnosti proudění, které v součástech s nekuhovým průřezem není ve všech oblastech stejnoměrné.



Obr. 92 Teplotní průběhy interního prostředí 0,3l „lahvičky“ – varianta B



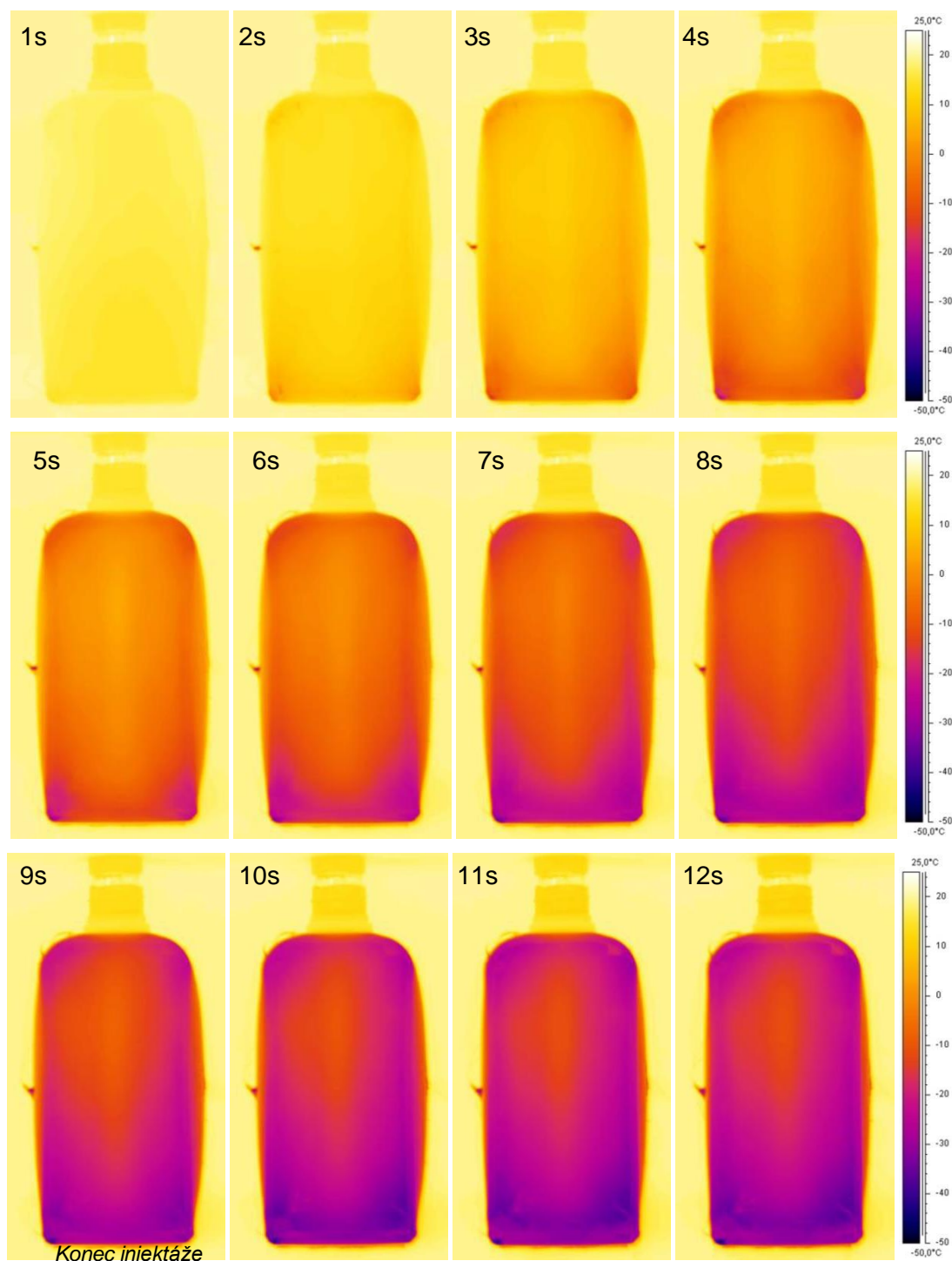
Obr. 93 Teplotní průběhy interního prostředí 0,3l „lahvičky“ – varianta C

Obrázky 92 a 93 znázorňují interní teplotní průběhy chladících variant B a C. Delší perioda injektáže CO₂ způsobila rovněž jako u 30 ml produktu ustálení interních teplotních průběhů, které také odpovídají přibližně třem sekundám. Nicméně je nutné si uvědomit, že oproti předcházejícímu experimentálnímu měření („Hrošík“) bylo využito dvou kapilár a oba parametry proto nejdou vzájemně srovnávat. Po třísekundové injektáži vykazovaly teplotní senzory ve všech lokacích produktu, vyjma pozic těsně sousedících s kalibračním trnem a rohů produktu, hodnoty blížící se teoretickému maximu chladícího potenciálu CO₂. Minimální dosahované teploty jednotlivých experimentálních měření jsou představeny v tabulce 19.

Tab. 19 Minimální dosahované teploty jednotlivých variant chlazení – 0,3l „lahvička“

Varianta chlazení	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T6 [°C]	T7 [°C]	T8 [°C]	T9 [°C]
A (2,8s)	-37,4	-41,6	-61,4	-1,2	-62,3	-33,3	3,3	-53,2	-42,2
B (5,6s)	-56,0	-67,7	-74,8	-28,4	-74,7	-63,0	-36,0	-72,3	-57,3
C (8,4s)	-58,0	-70,2	-75,4	-28,3	-76,1	-64,2	-38,7	-74,8	-60,3

Teplotní distribuce vnějšího povrchu 0,3 l produktu „lahev“



Obr. 94 Teplotní distribuce vnějšího povrchu 0,3 l „lahvičky“ během injektáže CO₂

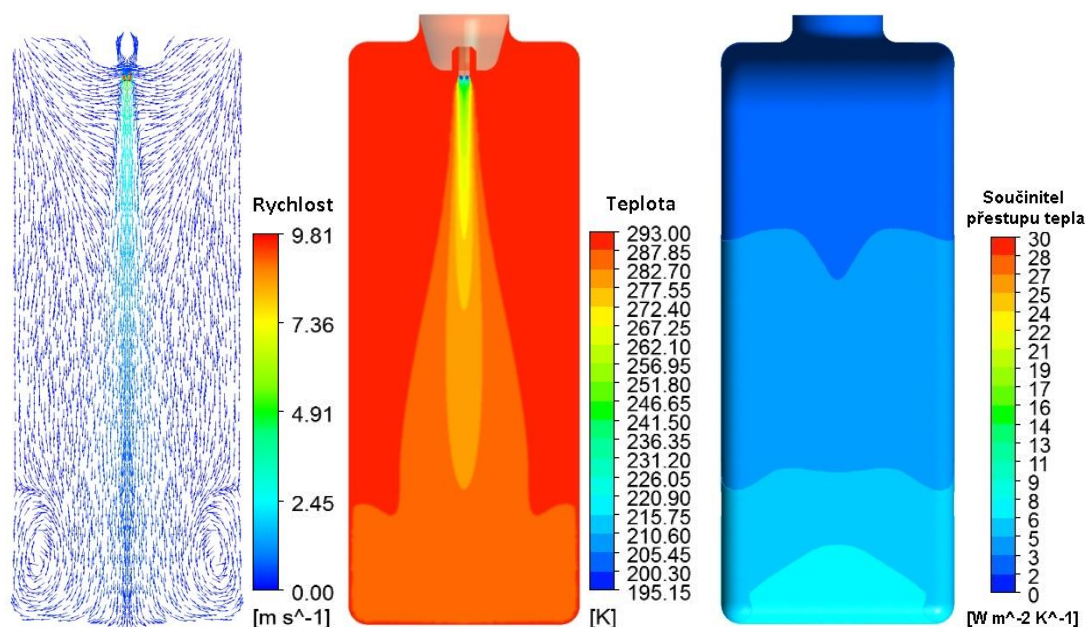
Obrázek 94 znázorňuje teplotní distribuci 0,3 litrového produktu při cca devítisekundové kontinuální injektáži. Termovizní snímky vnějšího povrchu produktu potvrzují, že vlivem proudění CO₂ dochází k nejvyššímu chladicímu efektu ve spodních částech lahvičky a nejnižšímu v oblasti hrdla produktu. Teplotní rozdíly se s použitým množstvím chladicího média stávají výraznější. Velmi vysoký chladicí

efekt byl rovněž zaznamenán v rozích, tj. v místech, kde byla evidována vyšší interní teplota chladícího média. V rozích produktu dochází vlivem rozdílné geometrie produktu (obdélníková podstava) a parizonu (kruhový tvar) k výraznému zeslabení tlouštěk stěn. Proto i vyšší teplota interního prostředí a s ní spojený nižší ochlazovací účinek CO₂ způsobily dosažení velmi nízkých teplot povrchu produktu. Stejně jako v předcházejícím případě byly z pořízených termovizních snímků stanoveny konkrétní teploty ve zvolených bodech, minimální, maximální a průměrné hodnoty celkového teplotního pole produktu, které jsou uvedeny v tabulce 20.

Tab. 20 Vyhodnocené parametry vnějšího teplotního pole 0,3l produktu „lahvička“

Čas	1 s	2 s	3 s	4 s	5 s	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s
T _{p1} [°C]	15,7	12,5	7,4	2,3	-2,4	-6,7	-10,6	-14,3	-17,5	-20,5	-22,0
T _{p2} [°C]	14,4	11,2	6,5	1,5	-3,4	-8,0	-12,0	-15,6	-18,7	-21,5	-22,8
T _{p3} [°C]	13,4	6,9	-2,2	-10,6	-17,2	-23,7	-29,1	-33,8	-37,9	-42,5	-43,7
Min [°C]	10,5	-5,2	-22,8	-33,0	-39,3	-43,6	-46,7	-50,1	-52,2	-54,4	-54,9
Max [°C]	19,0	18,6	18,1	17,7	17,4	17,2	17,1	16,9	-16,7	-16,5	-15,2
PRŮM	15,1	10,1	3,2	-3,1	-8,5	-13,2	-17,4	-21,1	-24,2	-27,2	-29,6

Simulace proudění 0,3l produktu „lahvička“

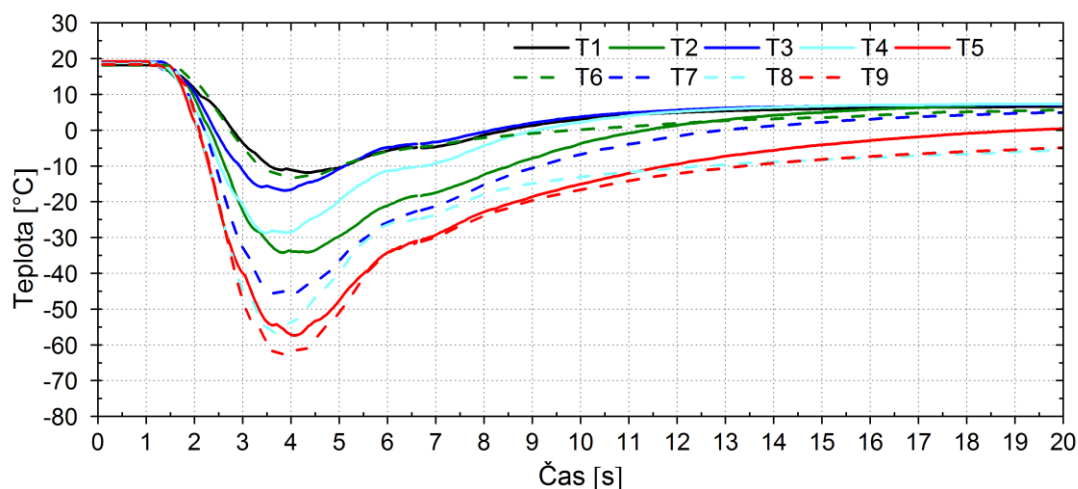


Obr. 95 Výsledky simulace proudění nekulové produktu – 0,3l „lahvička“

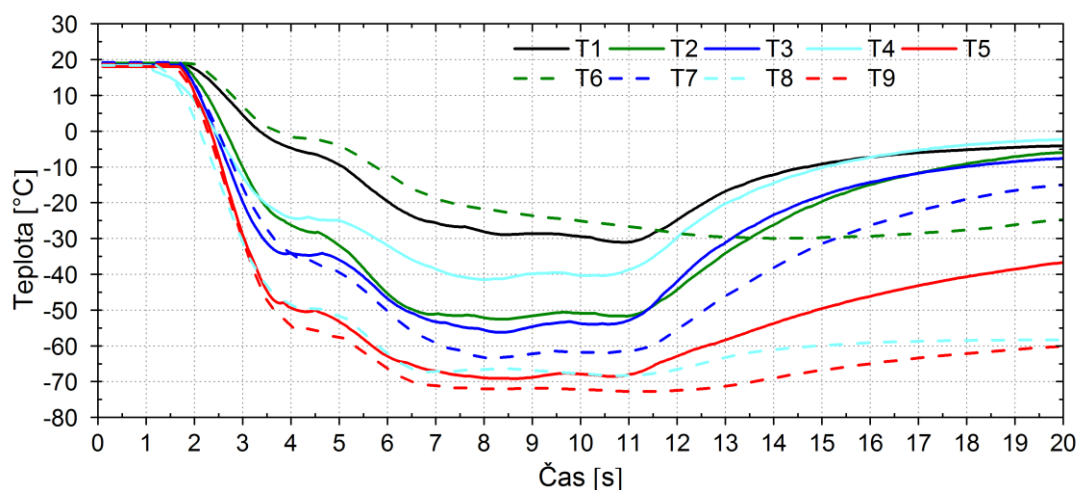
Výsledky matematické analýzy proudění CO₂ v 0,3 litrové lahvičce obdélníkové podstavy, odpovídající časovému okamžiku ustálení (2,9 sekund), jsou zobrazeny na obrázku 95. Také v tomto případě dochází nejprve k vytvoření středového (kuželovitěho) proudu, který po kontaktu se spodní stěnou produktu, kde předá nejvyšší část své tepelné energie, dále cirkuluje podél stěny produktu až k místu jeho odvodu. Z vyhodnocených výsledků je dále možné potvrdit experimentálně zjištěný předpoklad, že vlivem geometrie produktu (nekulový tvar)

jsou evidovány v rozích produktu nižší rychlosti proudění než v jeho středových lokacích.

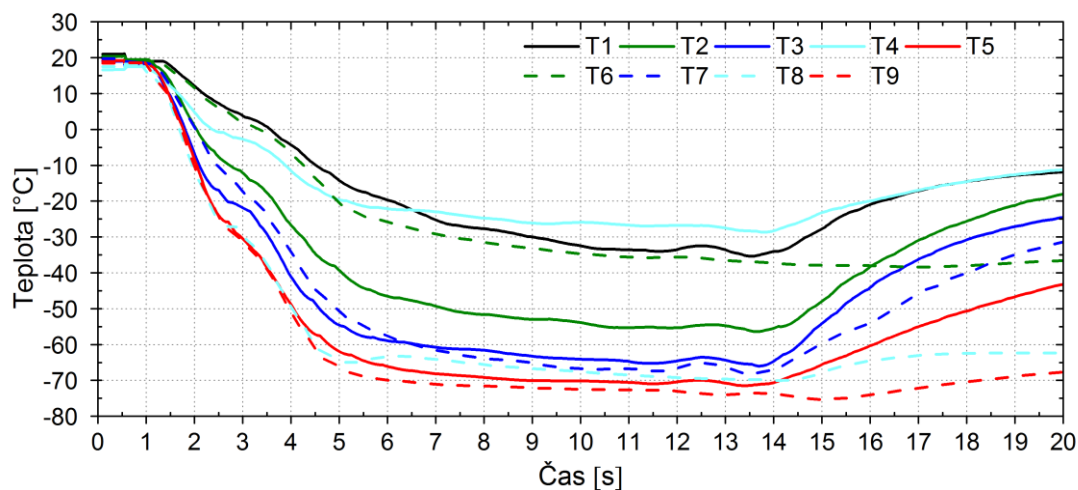
Teplotní průběhy interního prostředí 0,5l produktu „lahev“



Obr. 96 Teplotní průběhy interního prostředí 0,5l „lahvičky“ – varianta A



Obr. 97 Teplotní průběhy interního prostředí 0,5l „lahvičky“ – varianta B



Obr. 98 Teplotní průběhy interního prostředí 0,5l „lahvičky“ – varianta C

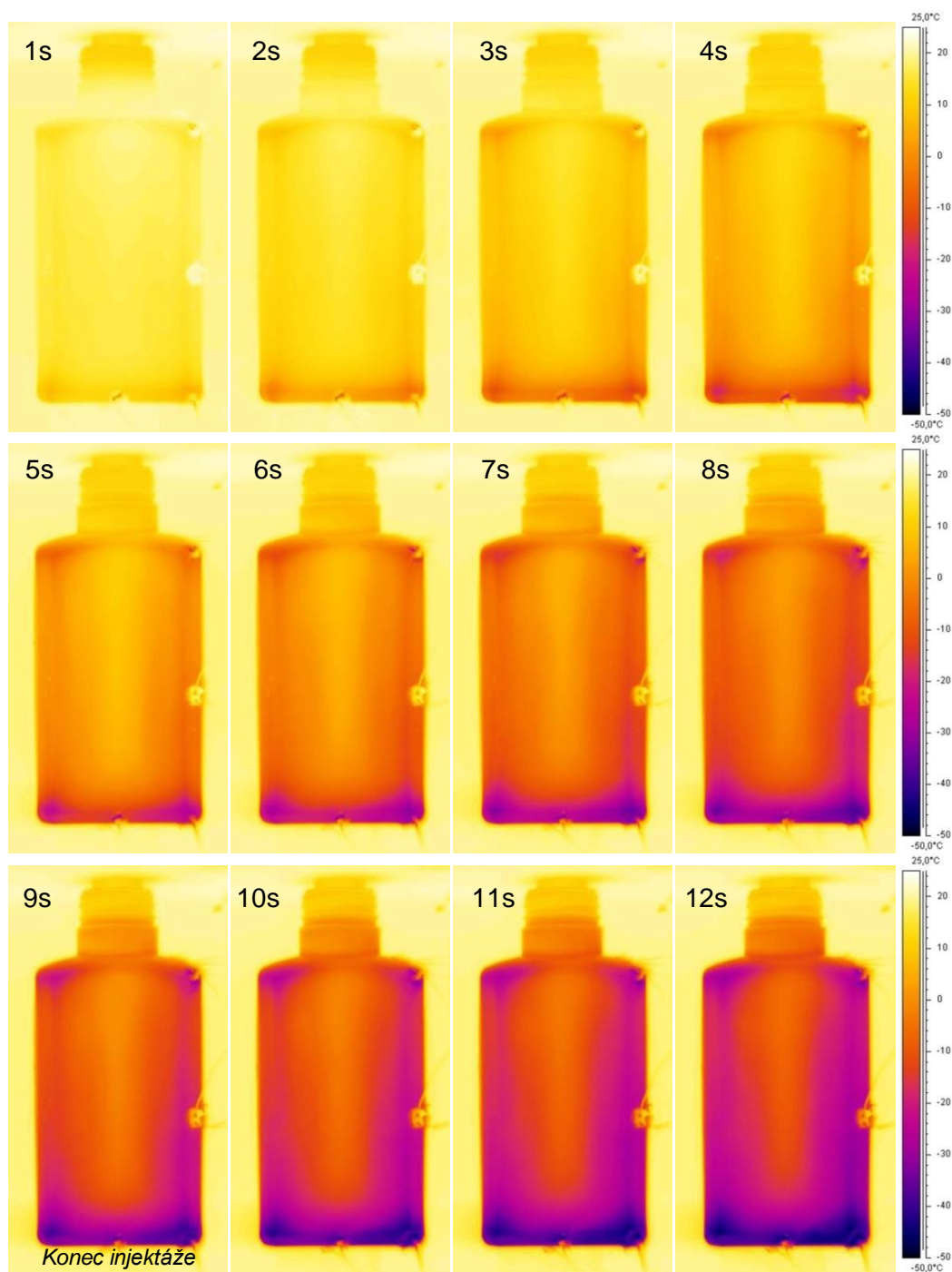
Na obrázcích 96 až 98 jsou představeny interní teplotní průběhy jednotlivých testovaných chladících variací (A, B, C) 0,5 litrového produktu. Ze zobrazených závislostí lze vyvodit stejné závěry o chladících charakteristikách CO₂ jako u obou předcházejících testovaných produktů. Expandující médium primárně dopadá do spodních částí produktu. Proto jsou v těchto místech také naměřeny minimální interní teploty. Chladicí efekt je tedy maximální ve dně produktu a dle záznamů teplotních senzorů umístěných po obvodu stěny produktu klesá směrem k místu jeho odvodu - ústí kalibračního trnu. Po určité časové periodě, která se v případě 0,5 litrového produktu rovná přibližně pěti sekundám, dochází k výraznému snížení poklesu interní teploty. V oblasti dna produktu se teplota proudícího média blíží teoretickému chladicímu maximu (-78 °C) a teplotní průběhy se dále jeví téměř konstantní. V ostatních oblastech dochází se zvyšující se délkou injektáže k postupnému zrovnoměření interních teplot a přiblížení se této hranici. Výjimku tvoří pouze místa stěn produktu v blízkosti kalibračního trnu (odvodu chladícího média) a hrany produktů. Konkrétní minimální dosahované interní teploty zaznamenané v měřených lokacích po obvodu produktu jsou uvedeny v tabulce 21.

Tab. 21 Minimální dosahované teploty jednotlivých variant chlazení – 0,5l „lahvička“

Varianta chlazení	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T6 [°C]	T7 [°C]	T8 [°C]	T9 [°C]
A (3,2s)	-11,0	-34,7	-13,1	-25,9	-55,1	-11,5	-43,3	-55,9	-61,7
B (6,4s)	-30,0	-52,8	-58,9	-42,8	-69,5	-32,8	-65,2	-67,7	-73,1
C (9,6s)	-35,4	-56,4	-65,9	-29,9	-71,5	-32,7	-69,3	-69,6	-75,5

Teplotní distribuce vnějšího povrchu 0,5l produktu „lahev“

Obrázek 99 znázorňuje distribuci povrchové teploty 0,5 litrového produktu během cca devítisekundové injektáže oxidu uhličitého. Dle předpokladů byly evidovány nejnižší teploty produktů, a tedy nejvyšší ochlazovací efekt ve dně a na hranách produktu, stejně jako u 0,3 litrového produktu. Nicméně jak ukazují vyhodnocená data, představená v tabulce 22, celkový ochlazovací efekt obou produktů není stejný, nýbrž u produktu s vyšším objemem byl vyhodnocen nižší ochlazovací efekt. Diference v efektivitách chlazení mezi oběma časově srovnatelnými experimentálními variantami (0,3 l a 0,5 l produkty), se zvětšovaly s použitým časem injektáže (množstvím chladiva). Například po dvousekundové injektáži činil rozdíl v minimální a průměrné teplotě přibližně sedm, respektive tři stupně celsia ve prospěch produktu s objemem menším a po osmisekundové injektáži tento rozdíl vzrostl na deset, respektive dvanáct stupňů celsia.

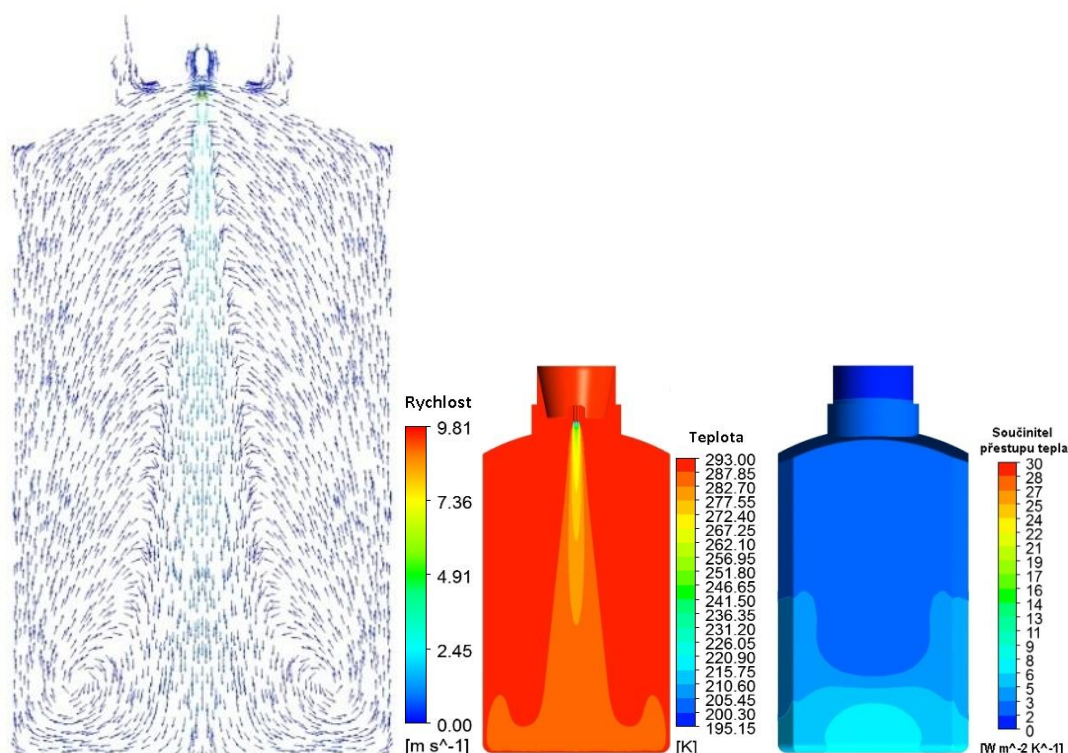


Obr. 99 Teplotní distribuce vnějšího povrchu 0,5l „lahvičky“ během injektáže CO₂

Tab. 22 Vyhodnocené parametry vnějšího teplotního pole 0,5l produktu „lahvička“

Čas	1s	2s	3s	4s	5s	6s	7s	8s	9s	10s	11s
T _{p1} [°C]	19,9	17,8	15,2	12,2	9,2	6,4	3,3	0,3	-2,4	-5,2	-7,5
T _{p2} [°C]	17,7	15,9	13,8	11,1	8,3	5,5	2,5	-0,4	-3,2	-6,0	-8,2
T _{p3} [°C]	15,6	9,1	2,4	-3,9	-9,5	-14,5	-19,4	-23,7	-27,7	-31,6	-34,6
Min [°C]	-0,9	-10,0	-17,5	-24,2	-30	-34,8	-38	-41,1	-44,8	-48,2	-50,3
Max [°C]	21,9	21,1	20,7	20,2	19,6	18,7	17,7	16,6	16,0	15,8	15,7
PRŮM	17,3	13,7	9,8	5,7	1,7	-2,0	-5,6	-8,9	-12,0	-14,9	-17,2

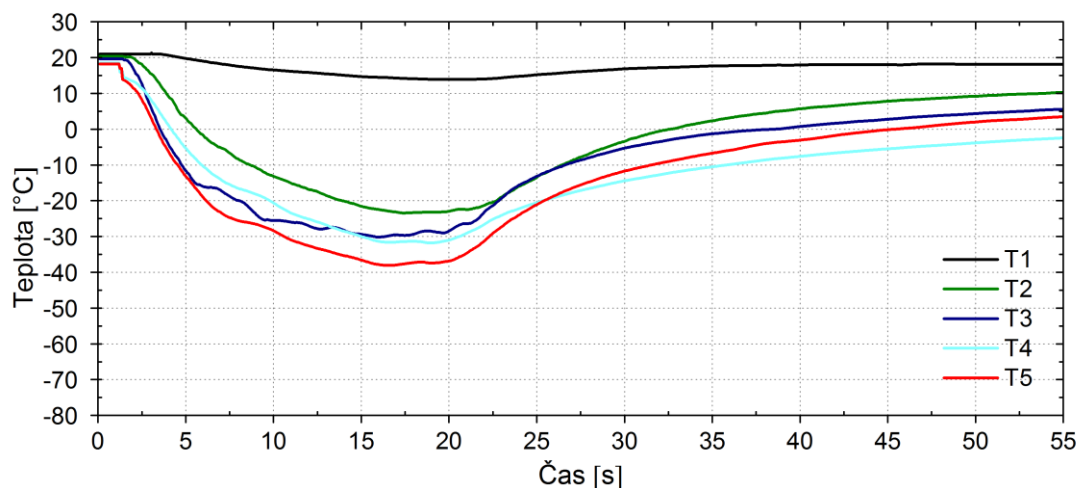
Simulace proudění 0,5l produktu „lahvička“



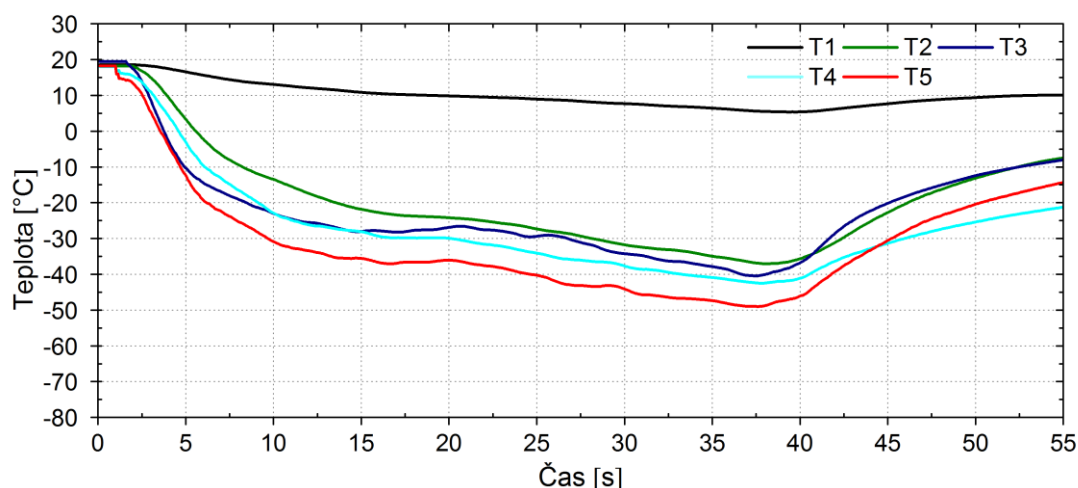
Obr. 100 Výsledky simulace proudění nekruhové produktu – 0,3l „lahvička“

Jak ukazuje obrázek 100, také simulace proudění v 0,5 litrovém produktu vykazovala obdobné závislosti, jako v předcházejících případech. Interní chladicí médium dopadá primárně do spodních částí produktu a následně je vedeno podél stěny produktu až k místu jeho odvodu, jenž je realizováno prostřednictvím kalibračního trnu a otevřeného odvětrávacího ventilu. Rovněž zde byly v okamžiku ustálení proudění (3,1 sekundy) evidovány rozdíly v rychlostech proudění mezi rohy a středem stěny produktu.

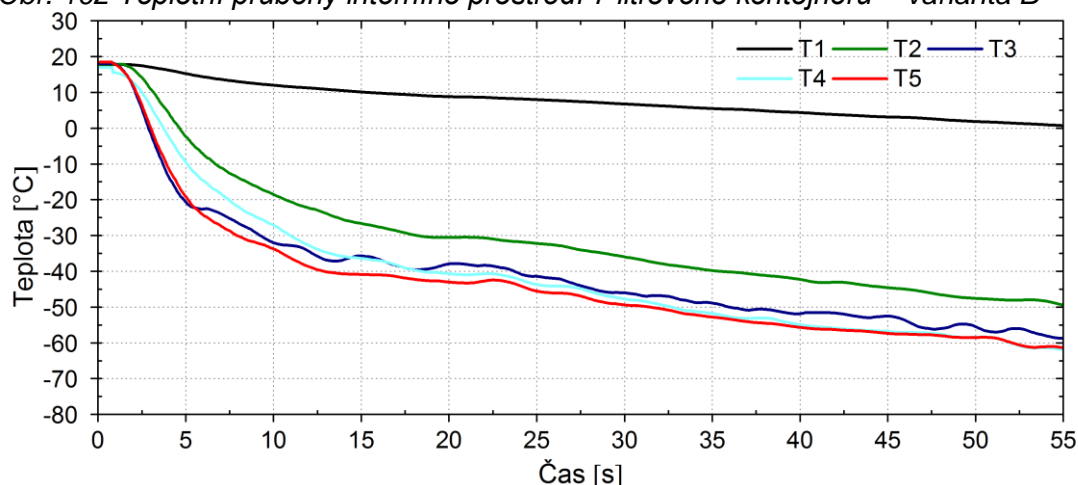
Teplotní průběhy interního prostředí 7l produkt „kontejner“



Obr. 101 Teplotní průběhy interního prostředí 7 litrového kontejneru – varianta A



Obr. 102 Teplotní průběhy interního prostředí 7 litrového kontejneru – varianta B



Obr. 103 Teplotní průběhy interního prostředí 7 litrového kontejneru – varianta C

Teplotní průběhy senzorů lokalizovaných po obvodu 7 litrového kontejneru při aplikaci experimentálních variant injektáže CO₂ (A, B, C) jsou představené na obrázcích 101 až 103. Stejně jako u všech testovaných produktů byly evidovány nejnižší hodnoty teplot (nejvyšší chladicí efekt) ve spodních částech produktu a naopak nejvyšší v oblasti sousedící s ústím trnu. Také v tomto experimentálním měření došlo po určité časové periodě, rovné přibližně osmi sekundám, k výraznému snížení poklesu interní teploty. Teplotní průběhy však oproti předcházejícím případům dále nejsou konstantní. Ani nejdelší chladicí varianta C, injektáž v periodě 48 sekund, neevokovala přiblížení se k teoretickému chladicímu maximu CO₂. Při dalším prodloužení periody vstřikování lze však předpokládat dosažení tohoto stavu. Nicméně k jeho docílení by bylo zapotřebí aplikovat výrazně vyšší množství chladicího média. Jsou-li porovnány interní teplotní průběhy jednotlivých produktů, je evidentní, že teplotní průběhy 7 litrového produktu dosahují nejvyšších teplot. Vyšší teploty interního média pak jasně predikují dosažení nižších chladicích efektivit. Konkrétní minimální interní teploty zaznamenané v měřených lokacích po obvodu 7 litrového produktu jsou uvedeny v tabulce 23.

Tab. 23 Minimální dosahované teploty jednotlivých variant chlazení – 7l kontejner

Varianta chlazení	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]
A (16s)	16,0	-23,8	-30,1	-31,3	-39,6
B (32s)	14,0	-37,1	-40,3	-42,7	-49,5
C (48s)	0,7	-39,3	-48,7	-50,1	-52,4

Teplotní distribuce vnějšího povrchu 7l produktu „kontejner“



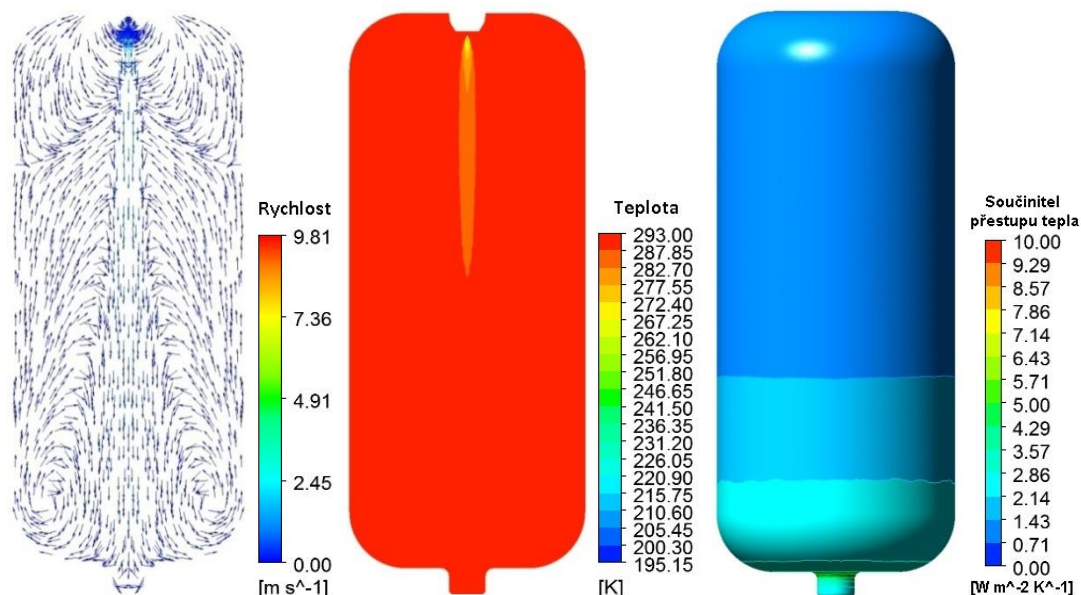
Obr. 104 Teplotní distribuce vnějšího povrchu 7l kontejneru během injektáže CO₂

Ochlazovací efekt 48 sekundové injektáže oxidu uhličitého na sedmilitrový produkt průměrné tloušťky stěny 4 mm je zobrazen na obrázku 104. Již na první pohled je evidentní, že vlivem většího objemu a tloušťky stěny produktu dosahovala efektivita chlazení výrazně nižších hodnot než u předcházejících testovaných produktů. Průměrná teplota povrchu kontejneru neklesla pod 0 °C ani při nejdelší chladicí variantě C (injektáži 228,4 gramů CO₂). Také teplotní distribuce vnějšího pole produktů vykazuje značné difference. Na produktu nejsou evidentní žádná místa teplotních extrémů, teplotní distribuce povrchu produktu se jeví jako rovnoměrná. Konkrétní vyhodnocené parametry teplot ve zvolených bodech, stejně tak jako průměrné, minimální a maximální teploty hodnocených teplotních polí, jsou uvedeny v tabulce 24.

Tab. 24 Vyhodnocené parametry vnějšího teplotního pole 7l produktu „kontejner“

Čas	4s	8s	12s	16s	20s	24s	28s	32s	36s	40s	44s	48s
T _{p1} [°C]	17,6	15,8	13,8	12,1	11,1	10,5	9,8	8,5	7,0	5,7	4,9	2,1
T _{p2} [°C]	18,1	15,6	13,0	10,8	9,5	8,9	8,0	6,4	4,6	3,0	2,0	-1,8
T _{p3} [°C]	18,0	15,7	13,1	11,2	9,8	9,1	8,1	6,5	4,7	3,1	2,2	-1,4
Min	10,9	10,1	9,1	8,3	7,7	6,5	5,2	2,5	0,1	-1,2	-4,9	-0,8
Max	23,6	23,5	23,3	23,1	22,9	22,7	22,3	22,1	21,8	21,4	21,2	20,5
PRŮM	18,1	16,1	13,9	12	10,8	10,1	9,3	7,9	6,4	4,9	4,1	0,8

Simulace proudění 7l produktu „kontejner“



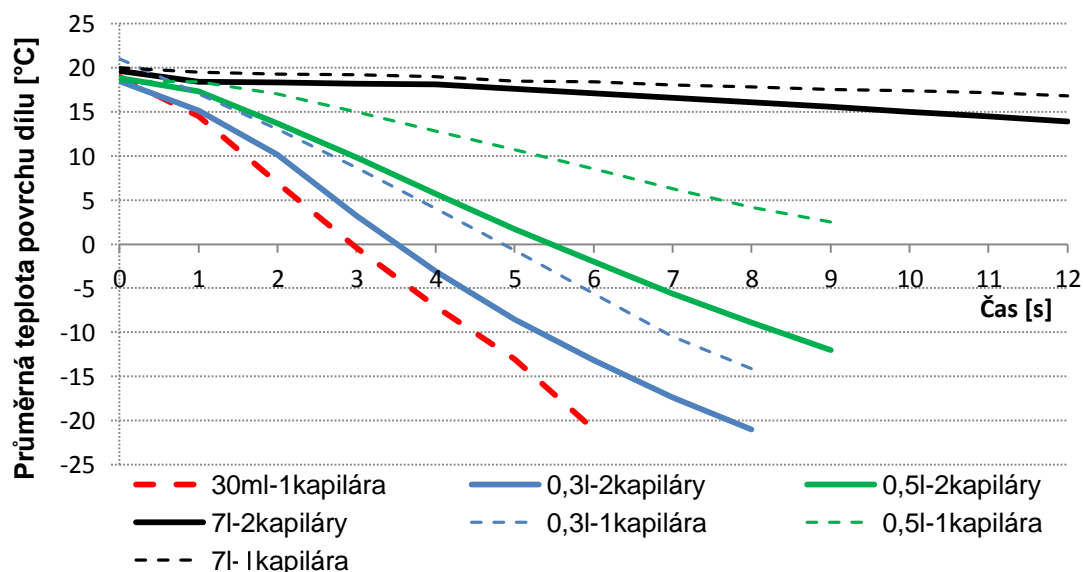
Obr. 105 Výsledky simulace proudění produktu – 7l „kontejner“

Výsledky matematické analýzy proudění plynného CO₂ v nejobjemnějším z testovaných produktů, 7 litrovém kontejneru, jsou zobrazeny na obrázku 105. Rovněž v tomto případě ustálené proudění (15,6 sekund) vykazuje zcela stejné charakteristiky jako ve výše představených případech. Přesto byl mezi prouděním

chladicího média v testovaných produktech pozorován znatelný rozdíl, a to v rychlostech proudění, které bylo vlivem velkého objemu produktu nejnižší právě u tohoto produktu.

Zhodnocení chladících charakteristik separovaného CO₂ interního systému

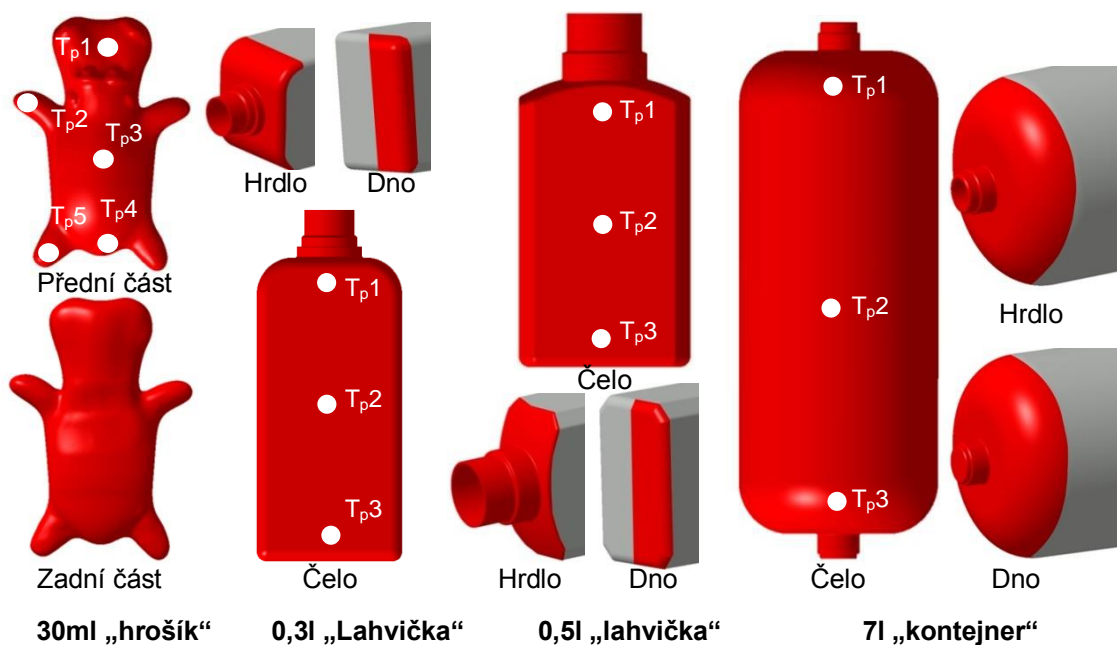
Interní teplotní průběhy všech testovaných výrobků dosahovaly nejnižších teplot v oblasti dna produktů. Injektované kapalně CO₂, tedy po expanzi vytvořilo proudění unášející atomizované krystalky oxidu uhličitýho, které primárně dopadaly do spodních partií produktů. Jak dokazují vyhodnocené termovizní snímky povrchové teploty produktů, byl proto právě v těchto lokacích evidován nejvyšší chladicí účinek. S rostoucí periodou injektáže, a tedy i množstvím chladicího média, docházelo k ustálení interních teplot, dosažení interních teplot blízkých se teoretickému chladicímu maximu CO₂ (-78 °C) a zrovnomnění teplotní distribuce povrchu produktů. Výjimku tvořil pouze neobjemnější 7 litrový produkt, kde této hranice nebylo dosaženo, což také způsobilo nižší efektivitu chlazení. Pro vzájemné porovnání účinnosti chlazení CO₂ injektáže v tvarově i objemově odlišných produktech byly na obrázku 106 stanoveny časové průběhy poklesů průměrné povrchové teploty dílů. Ze zobrazených průběhů je zřejmé, že nejintenzivnější a zároveň největší pokles průměrné povrchové teploty dosahoval produkt nejmenšího objemu, Hrošík. Intenzita poklesu teploty povrchu dílů, dosahované průměrné teploty, a tedy i chladicí efekt se zvyšujícím se objemem a tloušťkou stěny klesaly. Proto byl nejnižší chladicí efekt zaznamenán u 7 litrového produktu. Na obrázku 106 jsou kromě výše prezentovaných výsledků zobrazeny rovněž časové průběhy průměrné teploty povrchu dílů při aplikaci pouze jedné kapiláry (čárkovaná čára), a tedy polovičního množství použitého chladiva.



Obr. 106 Vzájemné porovnání efektivity chlazení injektáže CO₂ separovaného systému

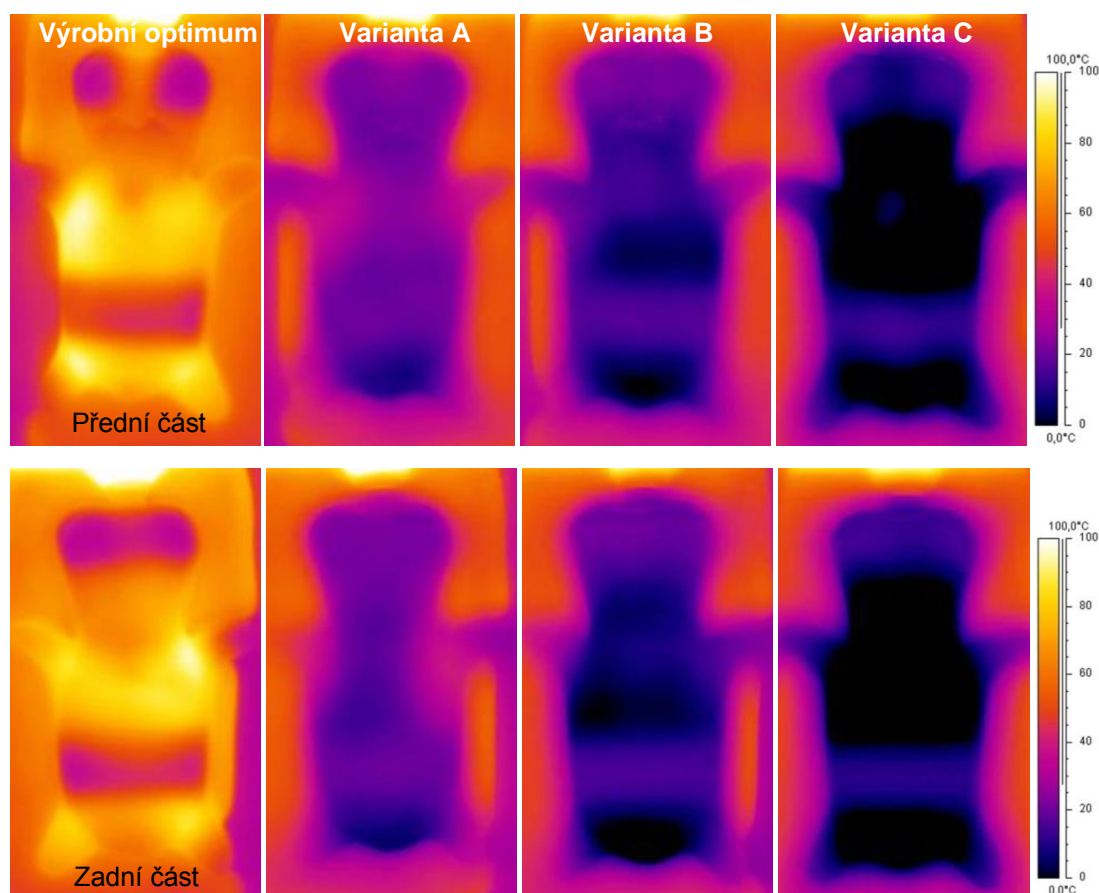
5.4.2 Experimentální stanovení navýšení účinnosti chlazení vyfukovacího procesu při aplikaci CO₂ interního chlazení

Experimentální produkce byla uskutečněna vzhledem k rozdílným objemovým a hmotnostním charakteristikám produktů na extruzních vyfukovacích strojích řady GM 250, GM 750 a GM 5000. Pro výrobu nejmenších produktů (30 ml a 0,3 l) byl použit jednošnekový pneumatický stroj GM 250. Pro 0,5 litrový produkt stroj GM 750, tedy stroj umožňující vyrábět objemnější produkty, a pro největší testovaný produkt stroj GM 5000. Stanovení navýšení účinnosti chlazení extruzně vyfukovacího procesu pomocí aplikace CO₂ interního chlazení bylo provedeno dle předestřené schématu (kapitola 5.4, tabulka 16). Do interních částí testovaných produktů byl na konci výrobní fáze (odvětrávání) pomocí dvou kapilár (vyjma 30 ml produktu) kontinuálně vstřikován kapalný oxid uhličitý v časových intervalech korespondujících s 20 %, 40 %, 60 % doby chlazení výrobního optima a pozorován nárůst chladicího efektu. K posouzení nárůstu efektivity chlazení a poklesu teplot odformovaných dílů bylo také zde s výhodnou využito termokamery FLIR 660. Po ustálení náběhu procesu byly produkty ihned po jejich odformování dvacátého kusu odebírány, ustavovány do předem zvolených pozic (obrázek 107) a snímány. Ze snímků byly následně vyhodnoceny (softwar ThermoCAM™ Researcher™ 2.9) teploty ve zvolených bodech, minimální, maximální a průměrné hodnoty teplotního pole, a také distribuce teplotního pole (procentuální zastoupení).



Obr. 107 Snímané pozice testovaných produktů společně s vyznačenými vyhodnocovanými oblastmi a body

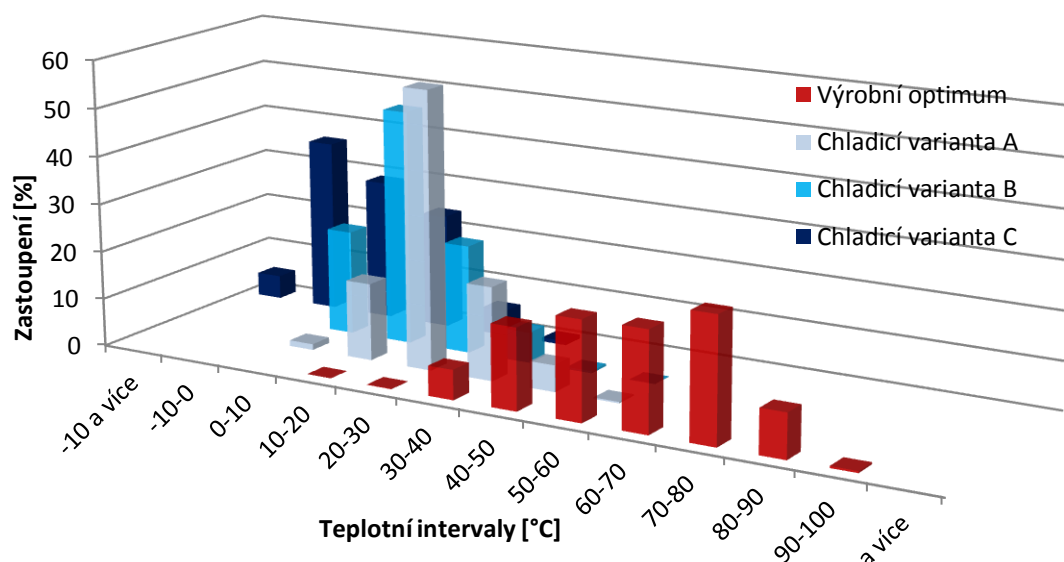
Nárůst efektivity chlazení 30 ml produktu „Hrošíka“



Obr. 108 Termovizní snímky odformovaných produktů – „Hrošík“

Na obrázku 108 jsou porovnány termovizní snímky přední a zadní strany nejmenšího testovaného produktu při nastavení technologických parametrů odpovídající výrobnímu maximu s termovizními snímky produkčních variací, ve kterých bylo využito injektáže kapalného CO₂ v časových intervalech korespondujících s 20 % (A), 40 % (B) a 60 % (C) celkové doby chlazení. Z termovizních snímků je zřejmý výrazný pokles teploty odformovaných produktů, a tedy navýšení efektivity chlazení, je-li aplikováno interní chlazení. Distribuce povrchové teploty není rovnoměrná. Ve střední části a ústí produktu se vyskytují zjevné difference. Tyto difference jsou způsobeny teplotními ději odformovávací fáze procesu, kdy je produkt uchopen do čelistí formy (viz příloha 2 práce), ve kterých je fixován za účelem odstranění tvarových přebytků. Kontakt čelistí s produktem způsobuje v případě, že je teplota tvarových čelistí formy nižší než je teplota odformovaného produktu (výrobní optimum), lokální ochlazení. Naopak je-li teplota produktu nižší než teplota tvarových částí formy (chladičí varianty B, C), dochází k ohřevu kontaktních ploch. Při vyhodnocení termovizních snímků je vzhledem k výše uvedenému nutno počítat s částečným zkreslením dosažených výsledků.

Obě snímané pozice (přední a zadní strana) vykazují zcela stejné závislosti a proto není zapotřebí je dále prezentovat separátně. Níže vyhodnocená data jsou proto průměrnou hodnotou dosažených výsledků obou pozic.



Obr. 109 Procentuální zastoupení teplotních intervalů – „Hrošík“

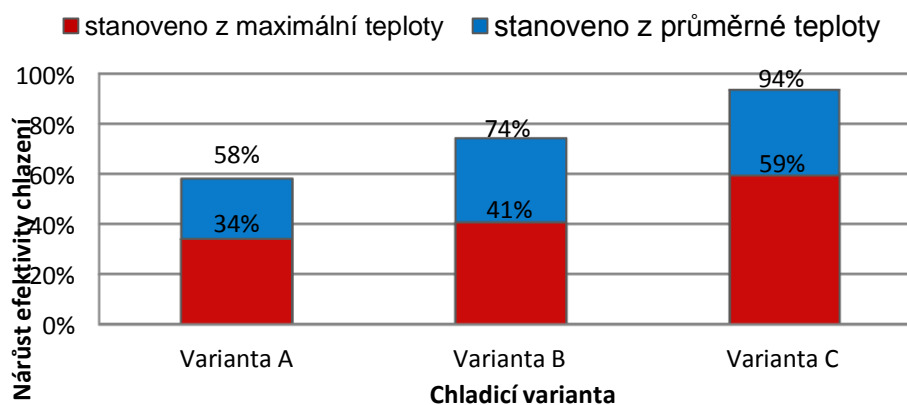
Kromě stanovení teplot ve zvolených bodech, minimální, maximální a průměrné hodnoty teplotního pole produktu, bylo další pozorovanou závislostí procentuální zastoupení teplotní distribuce. Z vyhodnocených dat prezentovaných na obrázku 109 a v tabulce 25 je evidentní, že výrobky produkované při technologickém nastavení, jež odpovídá výrobnímu optimu (maximu), mají nejvyšší procentuální zastoupení teplot pohybujících se v rozmezí od 40 °C do 80 °C. Průměrná teplotou dílu je 62 °C. Teplot vymezujících produkční maximum dosahuje jen velmi malé procento dílů (2 %), stejně tak jako teplotních minim, které jsou vymezeny kontaktem produktu s tvarovými čelistmi (odformování). Aplikace injektáže oxidu uhličitého v periodě 2 sekund (chladicí varianta A) způsobila výrazný nárůst chladicího efektu. Průměrná teplota povrchu dílů klesla na 26°C a procentuální distribuce povrchových teplot se stala užší. Nejvyššího zastoupení, 55%, dosahovaly teploty teplotního intervalu 20 až 30 °C. Také maximální a minimální teplota produktu výrazně klesla na hodnotu 60 °C, respektive 8 °C. Další zvyšování času injektáže a s ní spojené množství chladicího média samozřejmě způsobilo ještě vyšší snížení těchto parametrů. Při chladicí variantě B byly evidovány průměrné teploty povrchu dílů 16 °C, maximální teploty 54 °C, minimální -1 °C a oblast s největším procentuálním zastoupením klesla do teplotního intervalu 10 až 20 °C. Při aplikaci chladicí varianty C, nejdelší periody injektáže (6 sekund), byly naměřeny nejnižší teploty povrchu dílů -10 °C, maximální teploty 37 °C (oblast

kontaktu s tvarovými čelistmi formy). Také zde průměrná teplota povrchu dílů 4 °C odpovídala oblasti s největším procentuálním zastoupením.

Tab. 25 Vyhodnocené parametry z termovizních snímků 30 ml produktu – „Hrošík“

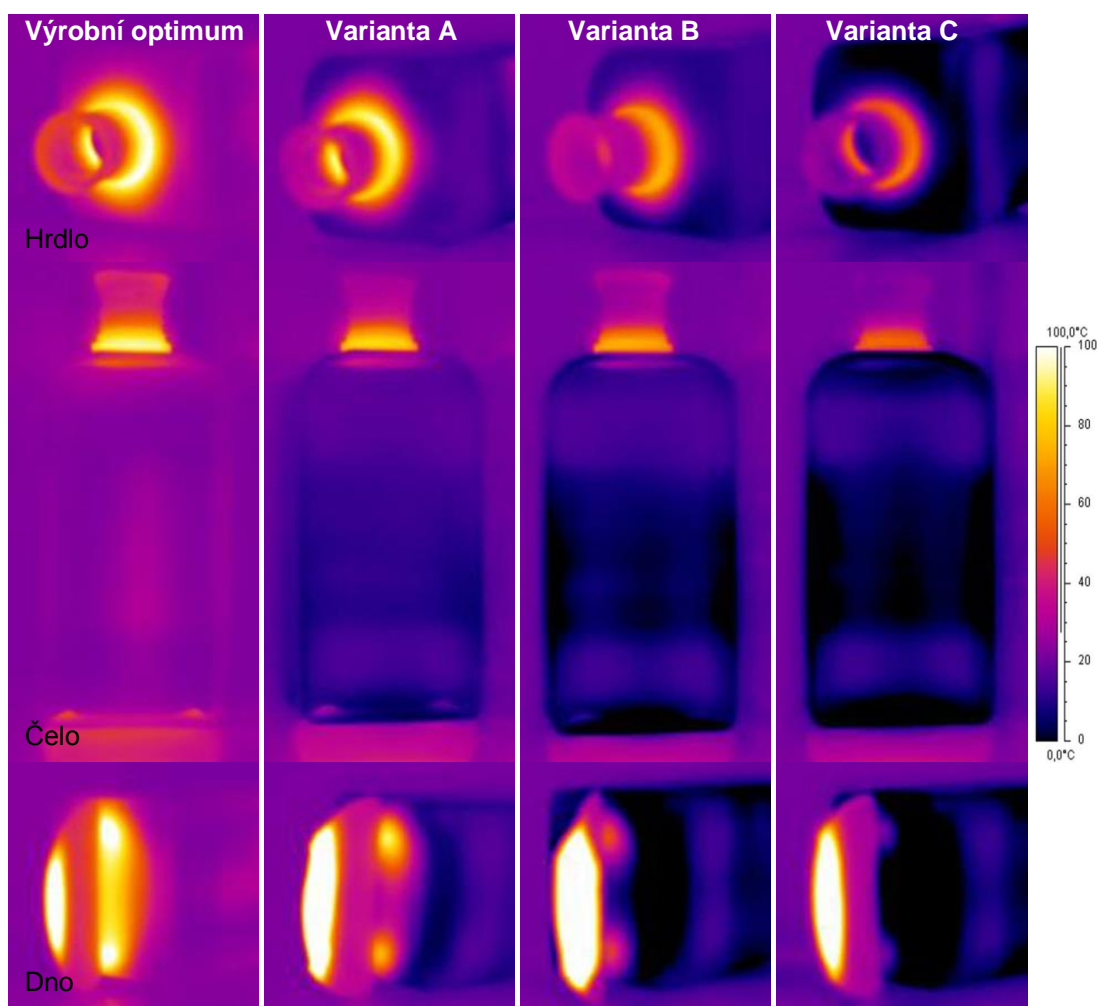
Parametr	Optimum	Varianta A	Varianta B	Varianta C
T _{p1} [°C]	34	23	20	14
T _{p2} [°C]	56	41	32	5
T _{p3} [°C]	43	20	17	13
T _{p4} [°C]	70	31	24	7
T _{p5} [°C]	68	10	-1	-7
Min [°C]	29	8	-1	-10
Max [°C]	91	60	54	37
PRŮM [°C]	62	26	16	4

Z prezentovaných dat bylo následně stanoveno procentuální navýšení účinnosti chlazení výrobního optima při aplikaci testovaných variant interního chlazení, viz obrázek 110. Vyhodnocovanými parametry byly průměrné a maximální teploty produktů. Při porovnání průměrných teplot povrchů odformovaných produktů byl evidován enormní pokles hodnot, a tedy velmi vysoký nárůst celkové efektivity chlazení. Při porovnání teplotních maxim se jednalo o výrazně nižší pokles. Jelikož je výrobní hranicí produkce maximální teplota odformovaných dílů, je nutno za směrodatnou hodnotu navýšení efektivity brát právě tyto výsledky. Dosažené výsledky navýšení efektivity chlazení stanovené z průměrných hodnot jsou teoreticky maximální možné hodnoty navýšení, které by nastalo v případě zcela rovnoměrného teplotního pole odformovaného produktu.



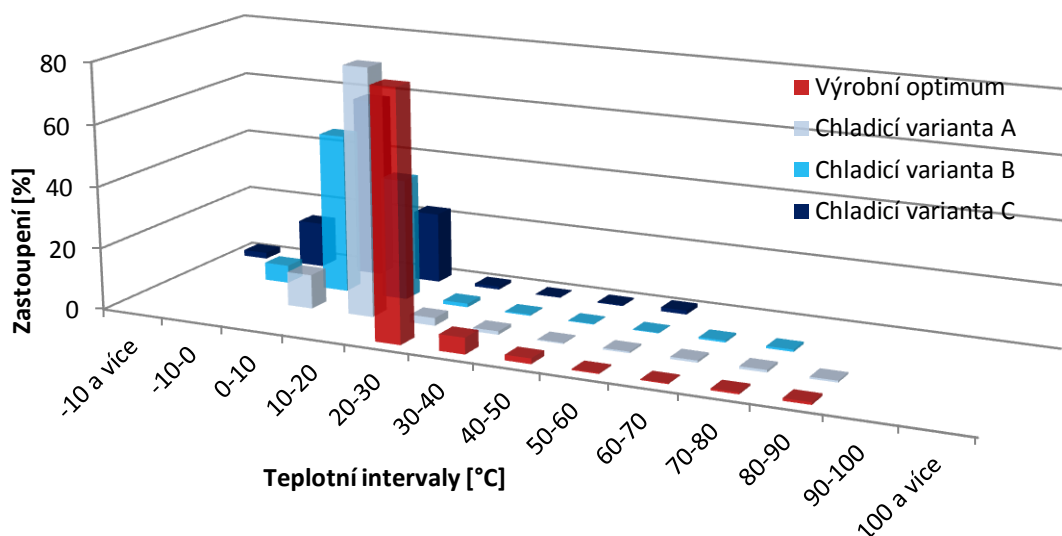
Obr. 110 Vyhodnocení nárůstu efektivity chlazení při aplikaci CO₂ injektáže nejmenšího testovaného produktu „hrošíka“

Nárůst efektivity chlazení 0,3 l produktu „lahvička“

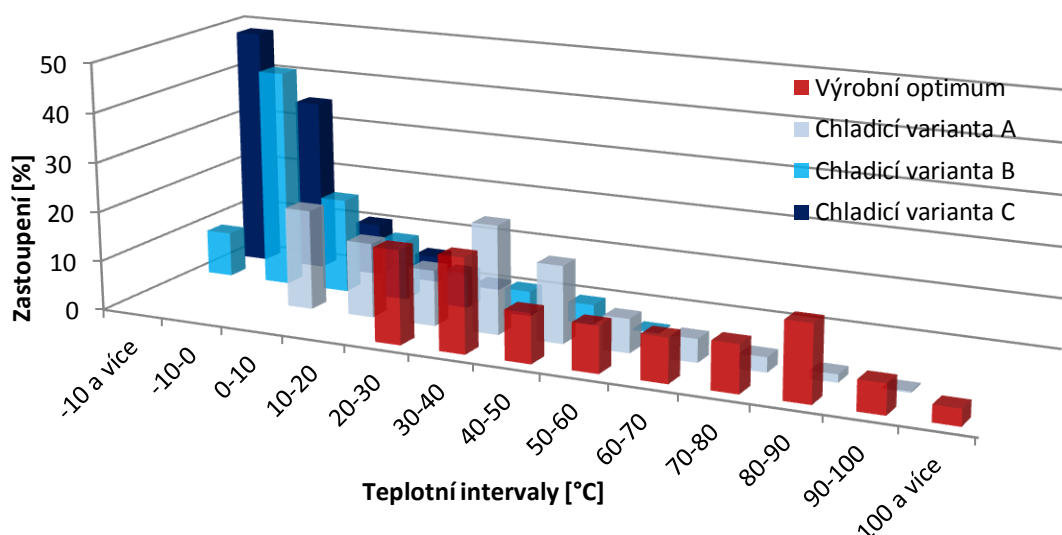


Obr. 111 Termovizní snímky odformovaných produktů – 0,3l „lahvička“

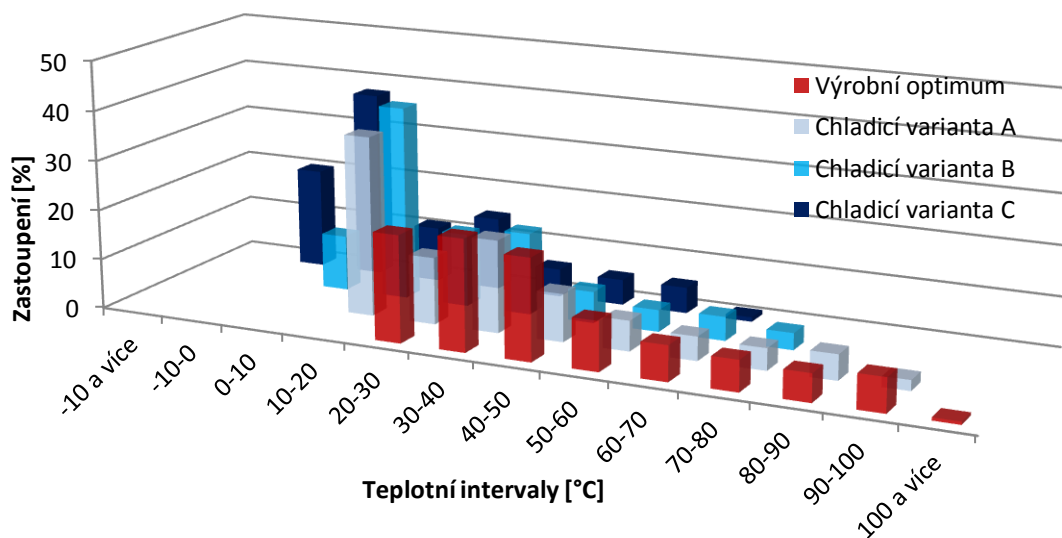
Obrázek 111 znázorňuje termovizní snímky teplotního pole 0,3 l produktu při nalezeném výrobním maximu společně s nárůstem efektivity chlazení při aplikaci CO₂ interního chlazení. Z termovizních snímků (tři snímané pozice) jsou evidentní místa výskytu teplotních extrémů. Jedná se o místa obou konců, tedy hrdla a dna, kontejneru. Důvodem vzniku teplotních extrémů v těchto lokacích je nerovnoměrný či nedostatečný teplotní odvod temperačně chladicího systému vyfukovací formy. Při extruzi roztaveného polymeru totiž vlivem gravitačních sil dochází k protahování parizonu, což má za následek hromadění materiálu v oblasti dna výrobku, a tedy i vyšší nároky na chladicí proces v těchto lokacích. Tvar závitu v oblasti hrdla formy (nejčastěji kalená vložka) značně znesnadňuje optimální rozmístění vrtaných chladicích kanálů, což také limituje rovnoměrnost teplotního odvodu. Z termovizních snímků teplotního pole odformovaného produktu, kde bylo využito CO₂ interního chlazení, je již na první pohled zřejmý nárůst efektivity chlazení vyfukovacího procesu. Geometrie produktu a konstrukční řešení fixačních čelistí (příloha 3 práce) ovlivňuje ve fázi odformování jen minimálně výsledné teplotní pole (oblast hrdla).



Obr. 112 Procentuální zastoupení teplotních intervalů 0,3l „lahvička“ – HRDLO



Obr. 113 Procentuální zastoupení teplotních intervalů 0,3l „lahvička“ – ČELO



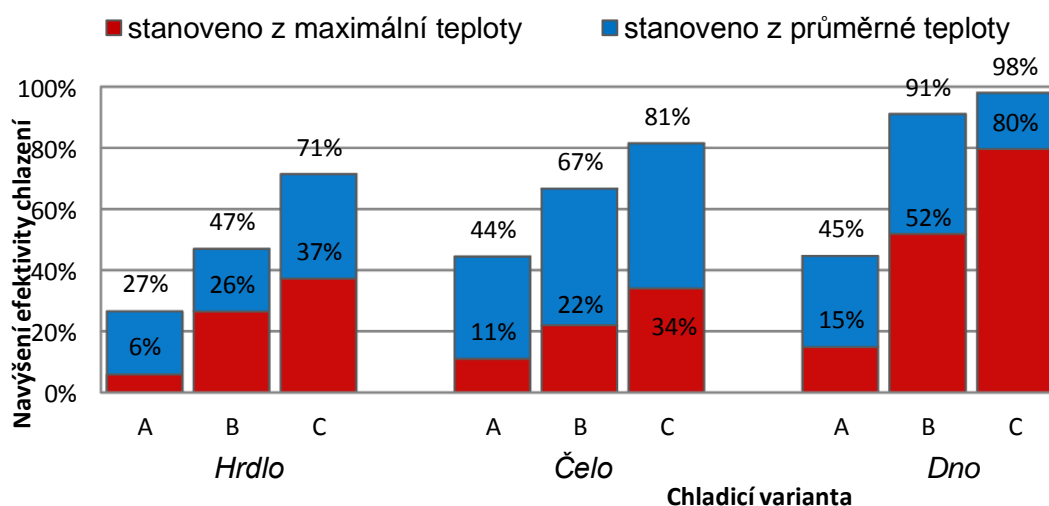
Obr. 114 Procentuální zastoupení teplotních intervalů 0,3l „lahvička“ – DNO

Z pořízených termovizních snímků (pozice 1 – hrdlo, pozice 2 – čelo, pozice 3 – dno, viz obrázek 107) byly stejně jako u 30 ml produktu vyhodnoceny teploty ve zvolených bodech. Dále minimální, maximální a průměrné hodnoty teplotního pole a procentuální rozložení teplotní distribuce. Vyhodnocená data jsou představena na obrázcích 112 až 114 a v tabulce 26. Procentuální rozložení teplotní distribuce čela povrchu produktu (pozice 2) při technologickém nastavení odpovídajícímu výrobnímu maximu vykazovaly rovnoměrné závislosti. Teplota povrchu odformovaných dílů se pohybovala v rozmezí od 20 °C do 100°C s 10 až 20 % zastoupením vyhodnocovaných desetistupňových teplotních intervalů. Zcela odlišné závislosti byly detekovány v další hodnocené lokaci - hrdle. Největší procentuální zastoupení, více jak 80 %, zde zaujímal teplotní interval 20 až 30°C. Vyšší teploty, 30°C až 100°C, byly zastoupeny jen ve velmi malých procentech. V poslední pozorované lokaci, oblasti dna lahvičky, byla opět evidována poměrně rovnoměrná teplotní distribuce, 5 až 25 % zastoupení jednotlivých teplotních intervalů. Hodnoty průměrných teplot oblastí odpovídající místům teplotních extrémů, hrdla a dna (56 °C, 49 °C), výrazně převyšovaly průměrné teploty čela produktu (27 °C). Při aplikaci injektaže oxidu uhličitého došlo k poklesu všech pozorovaných parametrů, poklesu minimálních, maximálních i průměrných teplot, a to v každé hodnocené pozici, viz tabulka 26. Nárůst chladicího efektu také zapříčinil skutečnost, že procentuální teplotní distribuce ve stěně a dnu produktu již nebyla rovnoměrná. Vyššího zastoupení dosahovaly nižší teploty. Se zvyšujícím se množstvím přivedeného média se detekované rozdíly stávaly ještě markantnější.

Tab. 26 Vyhodnocené parametry z termovizních snímků 0,3l produktu – „lahvička“

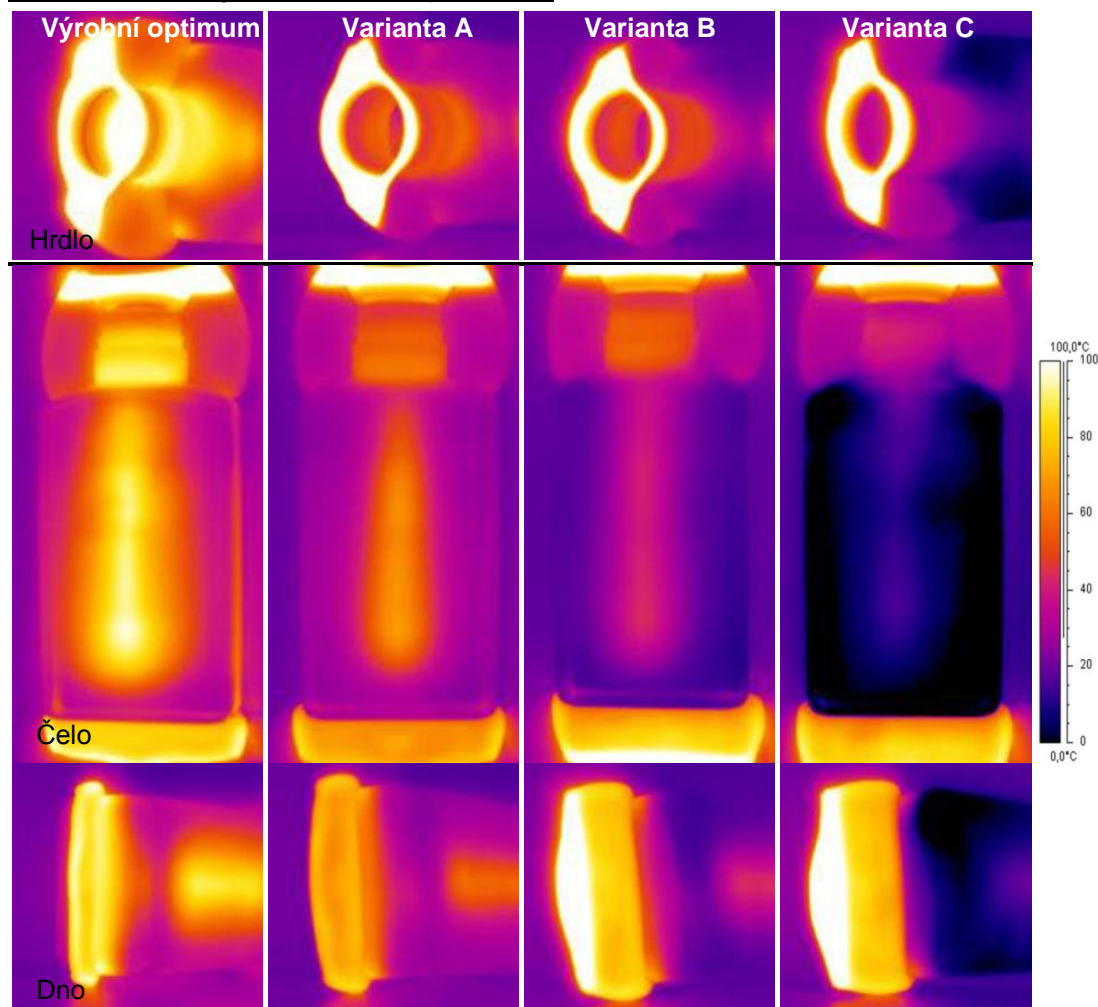
Parametr	Optimum	Varianta A	Varianta B	Varianta C
T _{p1} [°C]	28	20	14	2
T _{p2} [°C]	28	12	3	2
T _{p3} [°C]	28	5	-3	-10
Hrdlo produktu				
Min [°C]	23	12	4	-8
Max [°C]	102	96	75	64
PRŮM [°C]	49	36	26	14
Čelo (tělo) produktu				
Min [°C]	21	2	-8	-12
Max [°C]	85	76	66	56
PRŮM [°C]	27	15	9	5
Dno produktu				
Min [°C]	24	3	-7	-11
Max [°C]	108	92	52	22
PRŮM [°C]	56	31	5	1

Pro porovnání navýšení účinnosti chlazení vyfukovacího procesu při aplikaci testovaných variací CO₂ interního chlazení byly z vyhodnocených dat, vzhledem k výrobnímu optimu, stanoveny procentuální poklesy maximálních a průměrných teplot všech pozorovaných lokací, viz obrázek 115. Z předcházející kapitoly je již známo, že expandující oxid uhličitý primárně dopadá do spodních částí 0,3 litrového produktu, kde také odebírá největší část své tepelné energie. Nejvyšší chladicí efekt, pokles teplot povrchu dílů, by tak měl být evidován ve spodních částech produktu. Zobrazené výsledky potvrzují tuto predikci. Nejvyšší nárůst efektivity chlazení byl vyhodnocen právě v těchto lokacích, kde při aplikaci nejdelší chladicí varianty (C) bylo docíleno 80 % poklesu maximální teploty a 92 % poklesu teploty průměrné. Dle předpokladů vykazovala oblast těla a hrdla produktu výrazně nižší nárůsty efektivity. Jak již bylo poznamenáno, limitujícím prvkem výroby je maximální teplota odformovaných produktů, a proto je nutné brát za směrodatnou hranici vymezující navýšení efektivity chlazení nejnižší dosahované navýšení efektivity oblastí teplotních extrémů. Nejnižší pokles maximální teploty (oblast teplotních extrémů) byl detekován v oblasti hrdla, kde chladicí varianta injektaže A, 2,8 sekundová injektaž, evokovala 6 % pokles maximální teploty. Chladicí varianta B, 5,6 sekundová injektaž zapříčinila 26 % pokles maximální teploty a nejdelší chladicí varianta C (8,4 sekundová injektaž) 37 % pokles.



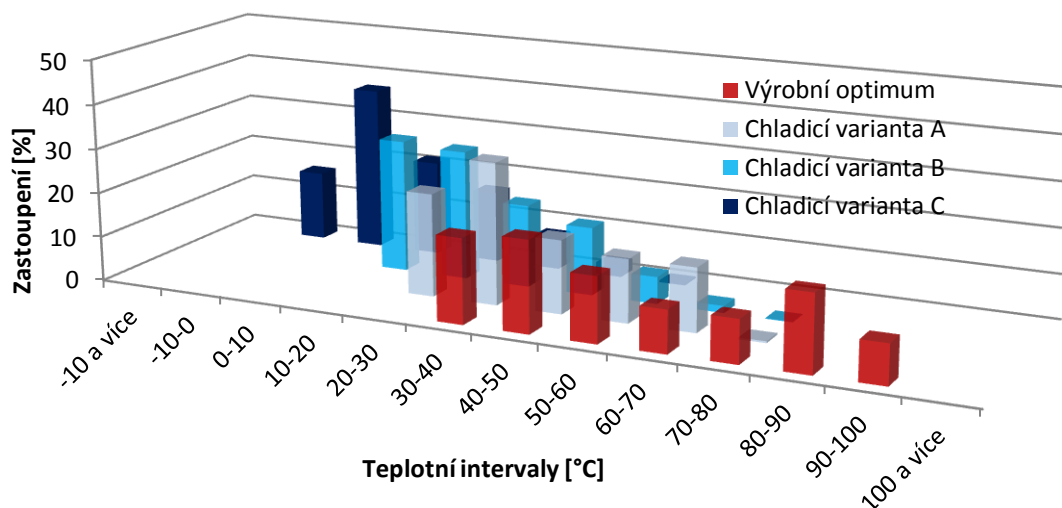
Obr. 115 Vyhodnocení nárůstu efektivity chlazení při aplikaci CO₂ injektaže testovaného produktu 0.3l „lahvička“

Nárůst efektivity chlazení 0,5l produktu

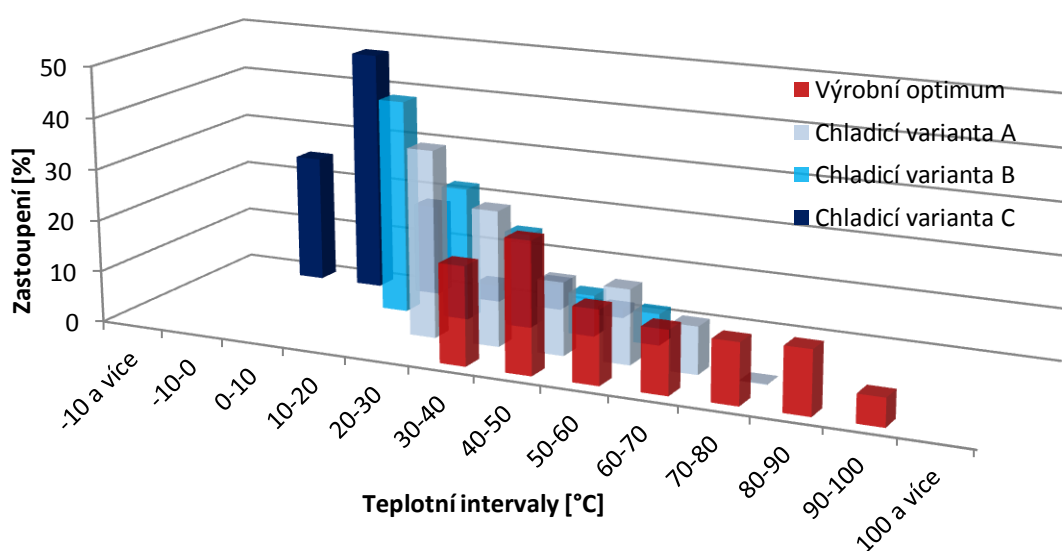


Obr. 116 Termovizní snímky odformovaných produktů – 0,5l „lahvička“

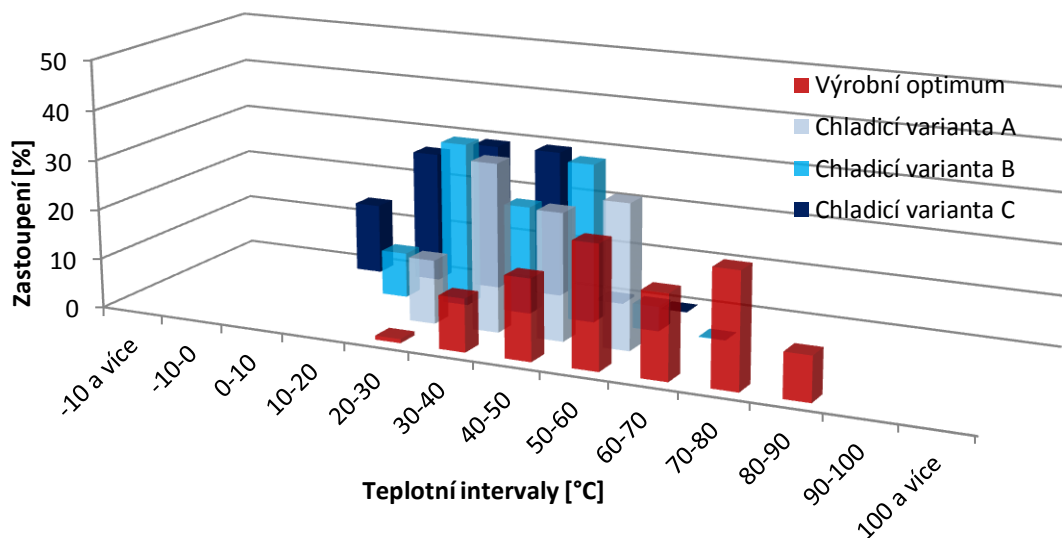
Termovizní snímky odformovaných produktů, odpovídajících technologickému nastavení výrobního optima, společně se snímky, jež reprezentují dosahované navýšení efektivity chlazení při aplikaci CO₂ injektáže, jsou zobrazeny na obrázku 116. Také termovizní snímky 0,5 litrové lahvičky vykazují místa teplotních extrémů, které se vyskytují v oblasti hrdla a dna. Teplotní distribuce povrchu přední stěny produktu (čela) však není tak rovnoměrná jako v přecházejícím případě (0,3 litrová lahev). Střed lahvičky vykazuje oproti rohům vyšší teploty. Důvodem těchto nehomogenit je nerovnoměrná distribuce tloušťky stěny lahvičky. Méně tvarované části parizonu (střed lahvičky) se vyznačují silnější tloušťkou stěny, než je tomu v případě značně tvarovaných částí produktu (rohů). Výsledkem je nerovnoměrný teplotní odvod externího temperačně chladicího systému a vznik teplotních diferencí. Tyto teplotní difference jsou tak u 0,5 l lahvičky v důsledku vyšších rozdílů ve ztenčení stěny mezi rohem a středem lahvičky v porovnání s 0,3 l lahvičkou výrazně vyšší. Při aplikaci CO₂ injektáže je z termovizních snímků již na první pohled zřejmý výrazný pokles teploty produktů a snížení teplot v kritických oblastech.



Obr. 117 Procentuální zastoupení teplotních intervalů 0,5l „lahvička“– HRDLO



Obr. 118 Procentuální zastoupení teplotních intervalů 0,5l „lahvička“– ČELO

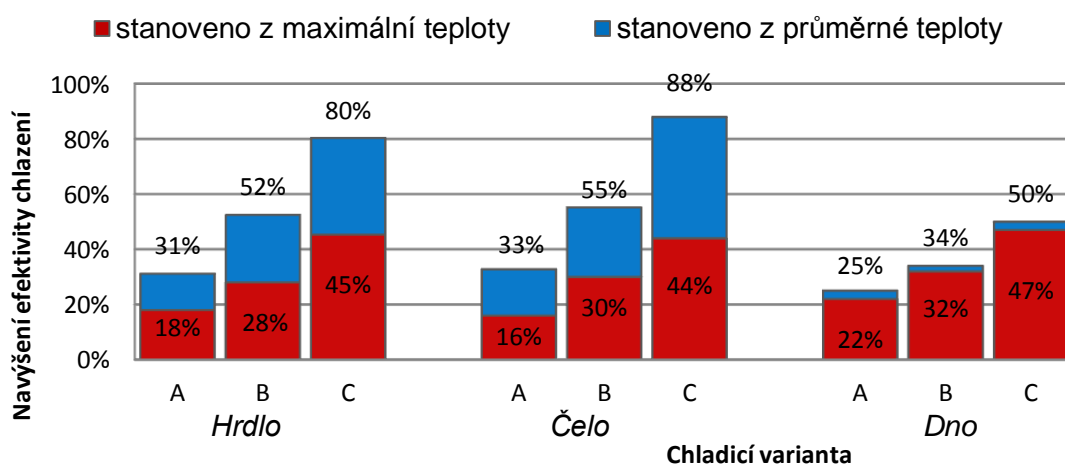


Obr. 119 Procentuální zastoupení teplotních intervalů 0,5l „lahvička“– DNO

Stejně jako v předcházejících případech byly z termovizních snímků stanoveny hodnoty teploty ve zvolených bodech, minimální, maximální, průměrné teploty teplotního pole (tři snímané pozice - oblast hrdla, čela, dna), a také procentuální rozložení teplotní distribuce (desetistupňové intervaly). Vyhodnocená data jsou představená na obrázcích 117 až 119 a v tabulce 27. Z uvedených dat je zřejmé, že procentuální rozložení teplotní distribuce dosahovalo při výrobním optimu v oblastech hrdla a čela 0,5 litrového produktu rovnoměrného rozložení (10 až 20 % zastoupení hodnocených teplotních intervalů). Naopak teplotní distribuce v oblasti dna produktu nevykazovaly rovnoměrné procentuální rozložení. Nejvyššího zastoupení, 20 až 30 %, zde dosahovaly teplotní intervaly 50 až 60 °C, 60 až 70 °C, 70 až 80 °C. Jak již bylo uvedeno, ve střední části těla lahvičky byly evidovány vyšší teploty než u 0,3 litrového produktu. Proto i rozdíly v minimálních, maximálních a průměrných teplotách byly mezi hodnocenými lokacemi hrdla, čela a dna výrazně nižší. Oblastí s nejvyšší detekovanou průměrnou teplotou povrchu bylo dno produktu. Dno však není limitující oblastí. Touto oblastí je v tomto případě oblast hrdla, kde maximální teplota povrchu dosahovala teplot 97 °C. Také jako v předcházejících případech využití chladicího potenciálu oxidu uhličitého evokovalo pokles všech pozorovaných parametrů. Procentuální zastoupení teplotní distribuce již nebylo rovnoměrné. Došlo k navýšení procentuálního zastoupení oblastí s nižší teplotou, které se dále zvyšovalo se zvyšujícím množstvím použitého chladicího média.

Tab. 27 Vyhodnocené parametry z termovizních snímků 0,5 produktu – „lahvička“

Parametr	Optimum	Varianta A	Varianta B	Varianta C
T _{p1} [°C]	66	44	38	20
T _{p2} [°C]	88	66	40	11
T _{p3} [°C]	41	33	19	-1
Hrdlo produktu				
Min [°C]	25	23	13	-10
Max [°C]	97	80	70	53
PRŮM [°C]	61	42	29	12
Čelo (tělo) produktu				
Min [°C]	29	21	10	-10
Max [°C]	98	82	73	61
PRŮM [°C]	58	39	26	7
Dno produktu				
Min [°C]	24	26	17	2
Max [°C]	86	67	57	46
PRŮM [°C]	65	49	43	33

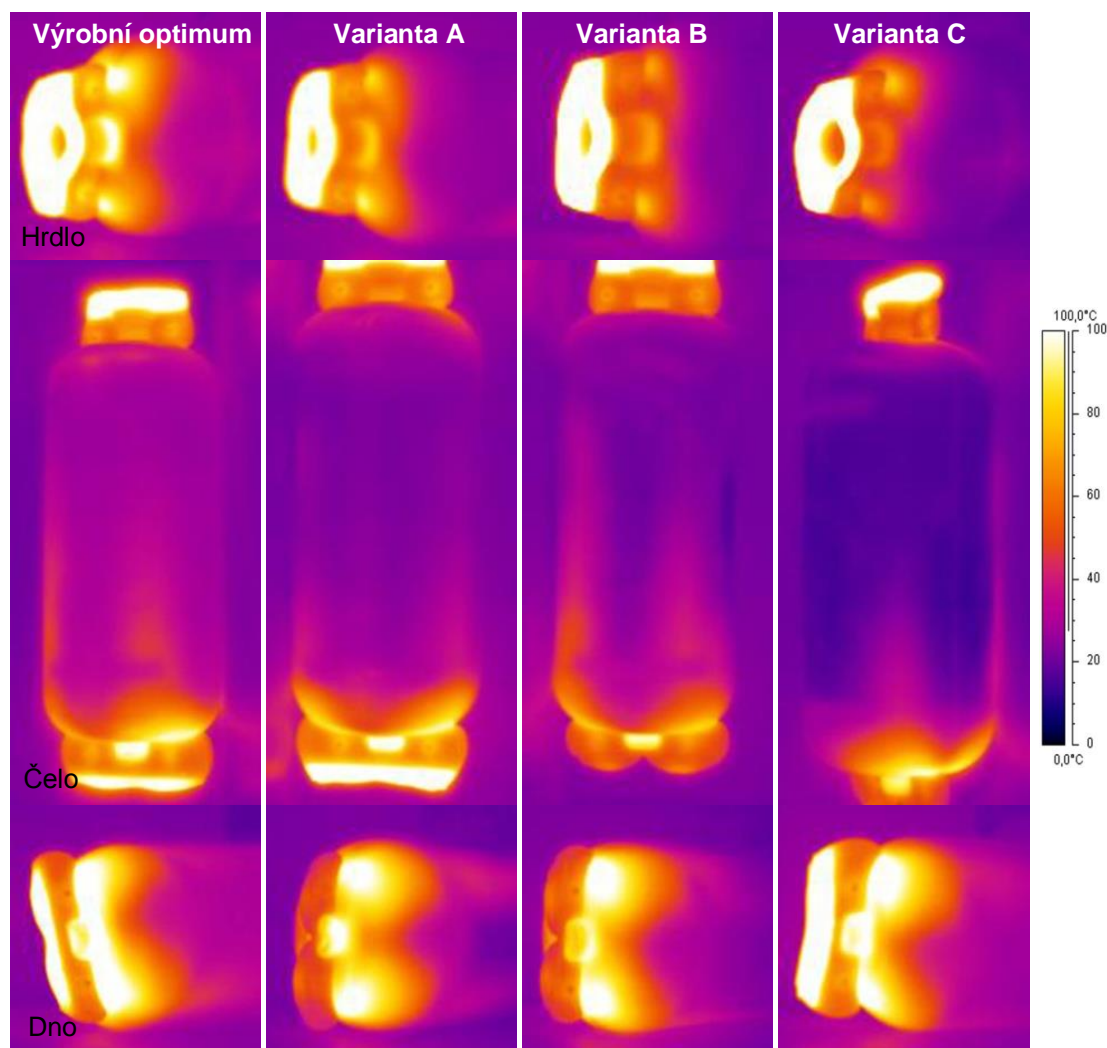


Obr. 120 Vyhodnocení nárůstu efektivity chlazení při aplikaci CO₂ injektáže testovaného produktu 0,5l „lahvička“

Také v tomto případě byly za účelem vzájemného porovnání navýšení efektivit chlazení z vyhodnocených dat stanoveny poklesy maximálních a průměrných teplot. Ze zobrazených závislostí (obrázek 120) je zřejmé, že poklesy maximální teploty ve všech pozorovaných lokacích dosahovaly při všech testovaných variacích injektáže podobných parametrů. Vysokou účinnost chlazení CO₂ injektáže v oblasti dna dokazuje velmi malý rozdíl mezi poklesy průměrné a maximální teploty. Jak již bylo předestřeno, limitující místo, tedy místo s nejvyšší maximální teplotou odformovaných produktů, se vyskytovalo v oblasti hrdla. Proto je za směrodatné navýšení efektivity chlazení nutno považovat 18 % navýšení (pokles max. teploty) v případě aplikace chladicí varianty A (3,2 sekundová injektáž), 28 % navýšení při 6,4 sekundové injektáži (varianta B) a 45 % navýšení chlazení při 9,6 sekundovém dávkování (varianta C).

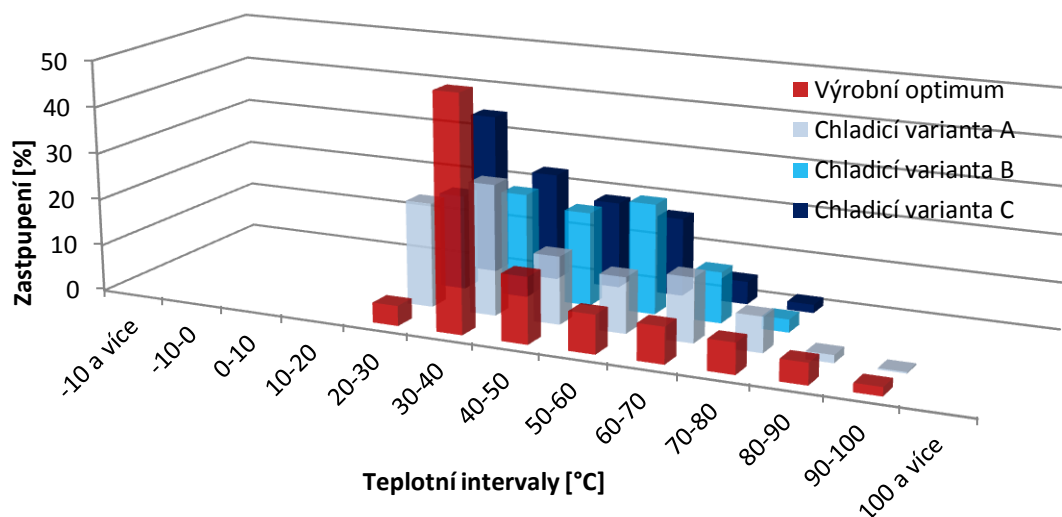
Nárůst efektivity chlazení 7 litrového produktu „kontejner“

Termovizní snímky nejobjemnějšího z testovaných produktů, jež jsou zobrazeny na obrázku 121, rovněž vykazují oblasti teplotních extrémů v místech hrdla a dna produktu. Již před stanovením hodnocených parametrů je možné z teplotního pole rozpoznat, že limitujícím místem produkce je dno produktu (oblast s největším procentuálním zastoupením maximální teploty). Dále je zřejmé, že nárůst chladicího efektu, nejen v tomto kritickém místě, nedosahuje stejné úrovně jako u předešlých produktů. Geometrie konstrukčního řešení fixačních čelistí ve fázi odformování (obdobně jako v předcházejících dvou případech) jen minimálně ovlivňuje výsledné teplotní pole.

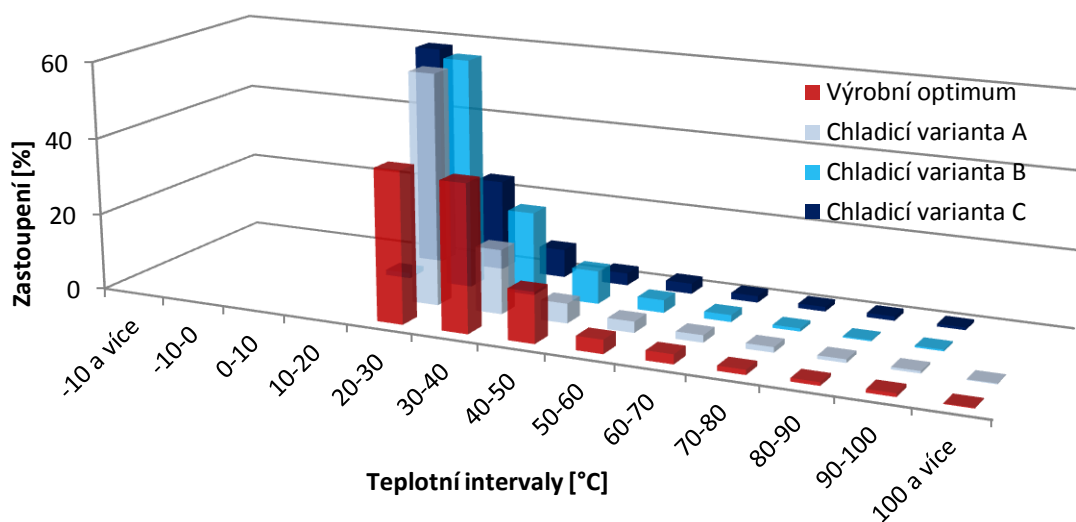


Obr. 121 Termovizní snímky odformovaných produktů – 7l kontejner

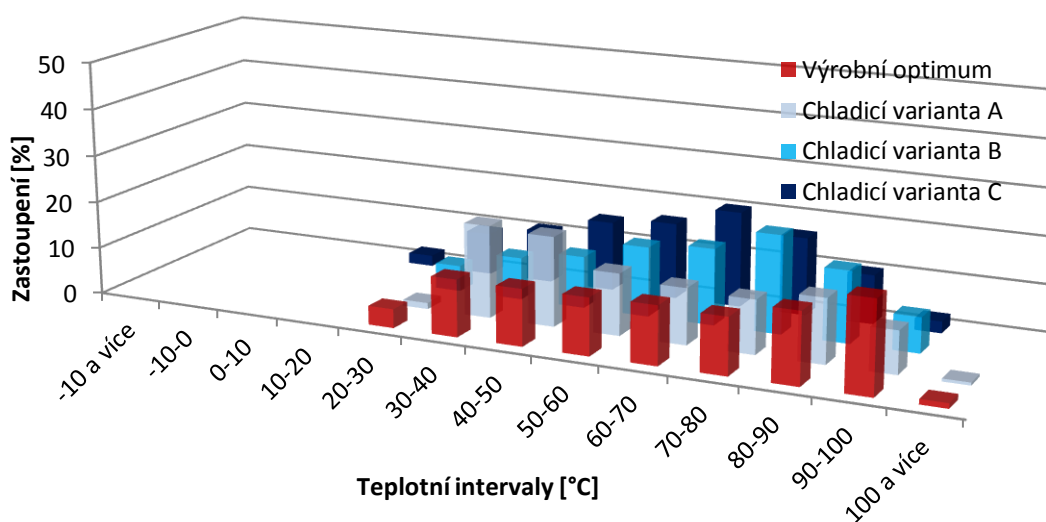
Vyhodnocené parametry minimální, maximální, průměrné teploty a procentuální distribuce teplotního pole jednotlivých hodnocených lokací, prezentované na obrázcích 122 až 124 a v tabulce 28, potvrzují výše uvedená tvrzení. Při technologickém nastavení odpovídající výrobnímu optimu je oblastí odformovaných produktů s největším procentuálním podílem produkčně limitujících teplot oblast dna produktu. Teplotního intervalu 90 až 100 °C zde dosahuje 22 % zastoupení a průměrná teplota této oblasti je 77 °C. Oblast hrdla odformovaných produktů je charakteristická průměrnou teplotou povrchu 60 °C. Kritického teplotního intervalu, 90 až 100 °C, dosahují pouhá 2 %. V oblasti čela produktu zaujímají největších procentuálních podílů intervaly 20 až 30 °C, 30 až 40 °C, a proto i průměrná teplota této lokace je 36 °C. Vyhodnocené teplotní parametry rovněž potvrzují, že při aplikaci injektáže CO₂ byl evidován znatelně nižší nárůst efektivity chlazení. Minimální teplota povrchu produktu neklesla při žádné z testovaných variací pod 13 °C.



Obr. 122 Procentuální zastoupení teplotních intervalů 7 I „kontejner“ – HRDLO



Obr. 123 Procentuální zastoupení teplotních intervalů 7I - „kontejner“ – ČELO

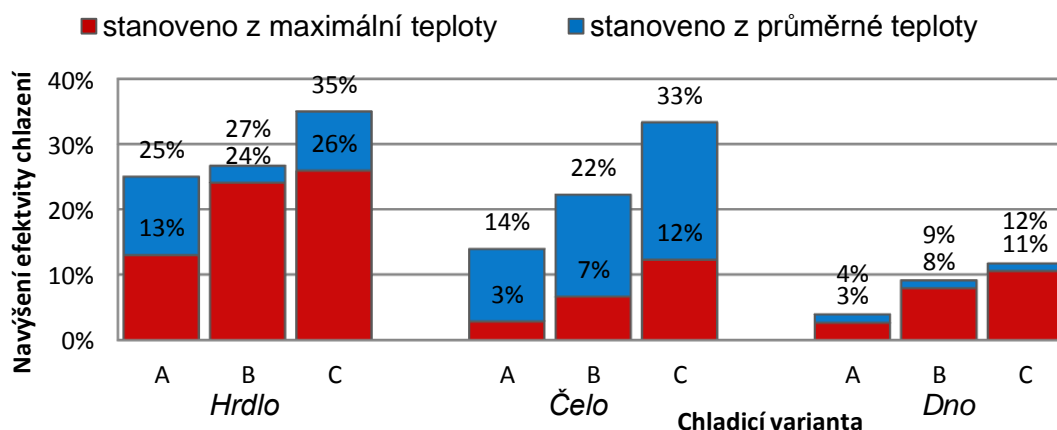


Obr. 124 Procentuální zastoupení teplotních intervalů 7I - „kontejner“ – DNO

Tab. 28 Vyhodnocené parametry z termovizních snímků 7l produktu – „kontejner“

Parametr	Optimum	Varianta A	Varianta B	Varianta C
T _{p1} [°C]	33	30	28	24
T _{p2} [°C]	34	28	25	24
T _{p3} [°C]	66	65	60	57
Hrdlo produktu				
Min [°C]	32	24	26	21
Max [°C]	108	94	82	80
PRŮM [°C]	60	45	44	39
Čelo (tělo) produktu				
Min [°C]	25	21	16	13
Max [°C]	106	103	99	93
PRŮM [°C]	36	31	28	24
Dno produktu				
Min [°C]	36	32	32	32
Max [°C]	114	111	105	102
PRŮM [°C]	77	74	70	68

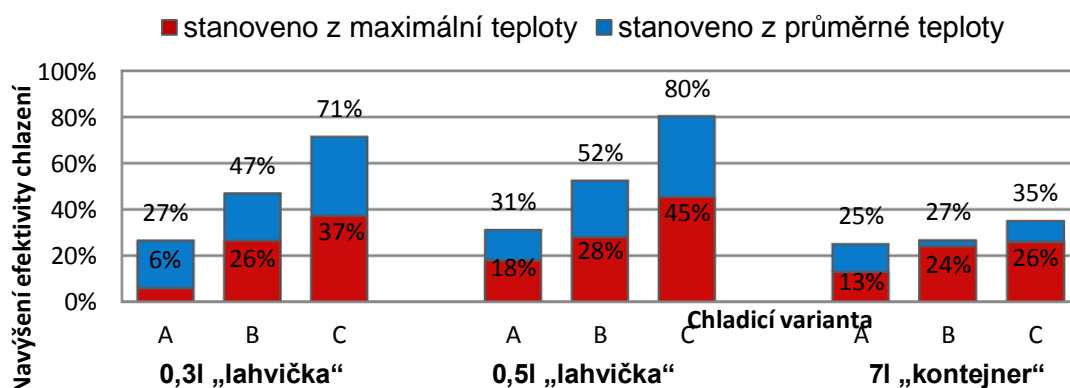
Na obrázku 125 je provedeno vzájemné srovnání dosahovaného navýšení efektivit chlazení jednotlivých hodnocených oblastí sedmilitrového produktu. Vzhledem k zjištěným chladicím charakteristikám CO₂ (nejnižší zaznamenané interní teploty média v oblasti dna), by měl být také největší pokles povrchové teploty odformovaných dílů, a tedy nárůst účinku chlazení, rovněž jako v předcházejících případech evidován v oblasti dna produktu. Největší nárůst efektivit se však vyskytoval v oblasti hrdla kontejneru, kde aplikace nejdelší chladicí varianty injektáže (C) evokovala 26 % nárůst efektivit chlazení. V oblastech těla a dna dosahovalo navýšení efektivit výrazně nižších hodnot. Při stejném technologickém nastavení se jednalo o 12 % navýšení v oblasti těla a 11 % navýšení v oblasti dna. Důvod tohoto efektu spočívá v nerovnoměrné distribuci tloušťky stěny v oblastech hrdla, těla a dna. Sedmilitrový kontejner má podstatně větší tloušťku stěny než ostatní testované produkty (průměrná tloušťka 4 mm), která také v souvislosti s 90 sekundovou extruzí evokuje (vlivem gravitačních sil) větší protažení parizonu, a tedy větší tloušťku stěny v oblasti dna. Silnější tloušťka stěny v oblasti dna pak neumožňuje tak efektivní přestup tepla stěnou produktu, jako přestup tepla v oblastech s nižší tloušťkou. Výsledkem je nižší chladicí efekt, čili vyšší teplota povrchu dílů v oblasti dna, přestože interní chladicí médium zaujímá nejnižší teploty právě v těchto oblastech. Ostatní testované produkty se vyznačují podstatně menší tloušťkou stěny, a proto se při jejich produkci a aplikaci interního chlazení tento efekt nemohl projevit tak výrazně jako u tohoto produktu.



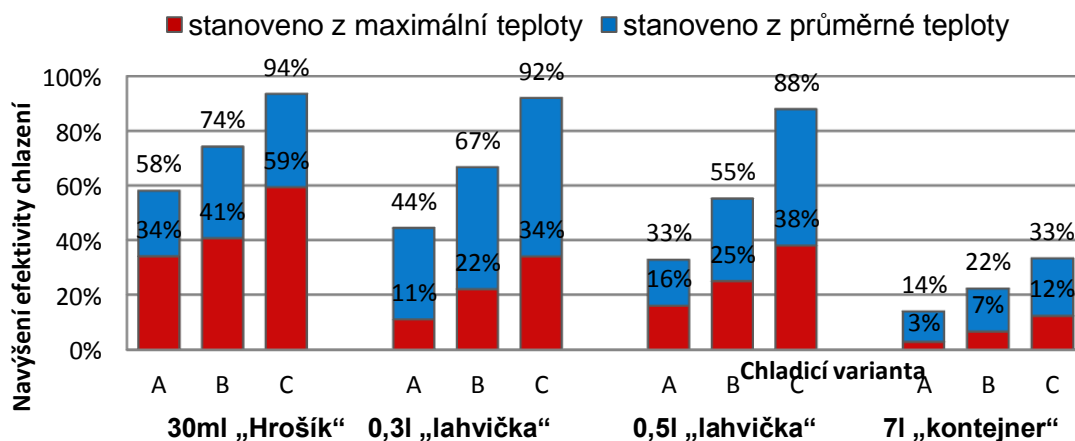
Obr. 125 Vyhodnocení nárůstu efektivity chlazení při aplikaci CO₂ injektáže testovaného produktu 7l „kontejner“

Zhodnocení navýšení účinnosti chlazení vyfukovacího procesu při aplikaci CO₂ interního chlazení

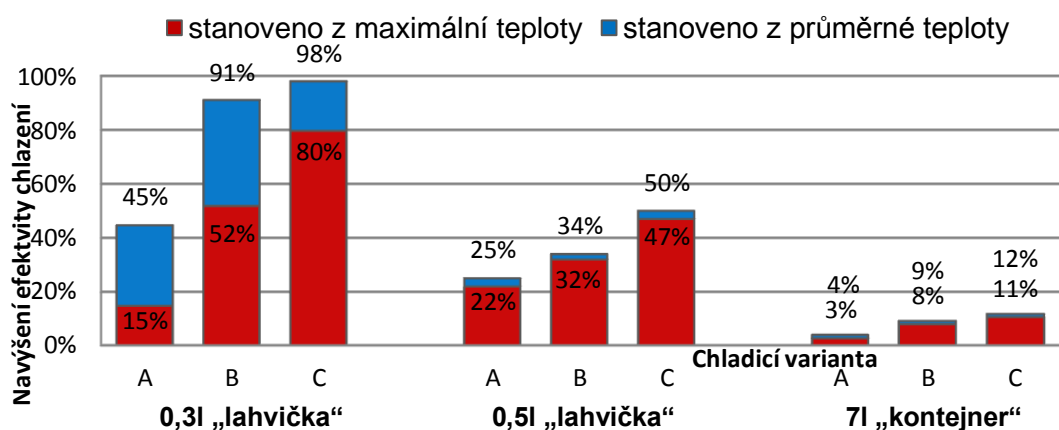
Za účelem zhodnocení navýšení účinnosti chlazení vyfukovacího procesu testovaných tvarově i objemově rozdílných produktů jsou dosahované výsledky jednotlivých hodnocených lokací vzájemně porovnány na obrázcích 126 až 128. Z experimentálního stanovení chladících charakteristik injektovaného oxidu uhličitého je již známo, že interní teplotní průběhy zaujímají nejnižší teploty ve spodních částech produktů, a proto lze předpokládat nejvyšší chladicí efekt právě v těchto lokacích. Dále bylo zjištěno, že efektivita chlazení při testování jednotlivých variant injektáže (A, B, C) separovaného interního systému klesala s rostoucím objemem a tloušťkou stěny produktu. Z vyhodnocených nárůstů efektivit chlazení stanovených z poklesu průměrných teplot je zřejmé enormní zvýšení chladicího potenciálu vyfukovacího stroje. Pro procesní efektivitu a kvalitu dílů (vnitřní prnutí, deformace) je však nutné brát za směrodatný (kritický) parametr pokles maximální teploty. Proto se níže vyvozené závěry vztahují právě k tomuto parametru. Dle předpokladů byl evidován nejvyšší nárůst efektivity chlazení ve spodních částech produktů. Výjimku tvořil pouze neobjemnější produkt, kde nerovnoměrná distribuce společně s velkou tloušťkou stěny v oblasti dna způsobila méně intenzivní přestup tepla, což způsobilo, že oblasti s menší tloušťkou stěny (hrdlo) vykazovaly vyšší nárůst efektivity. Stejně jako při hodnocení chladících charakteristik separovaného interního systému (čelní pohled – pozice 2) dosahovaná efektivita chlazení klesala s rostoucím objemem a tloušťkou stěny produktu. Tyto rozdíly v efektivitě jsou v oblasti dna ještě markantnější. Oblast hrdla však tyto predikce nepotvrzuje.



Obr. 126 Srovnání nárůstu efektivity chlazení při aplikaci CO₂ interního chlazení testovaných produktů – oblast HRDLA



Obr. 127 Srovnání nárůstu efektivity chlazení při aplikaci CO₂ interního chlazení testovaných produktů – oblast ČELO



Obr. 128 Srovnání nárůstu efektivity chlazení při aplikaci CO₂ interního chlazení testovaných produktů – oblast DNO

5.5 Ekonomické posouzení aplikovatelnosti CO₂ chladicího systému

Efektivita chlazení vyfukovacího procesu je pro výrobce jistě zajímavým parametrem. Nicméně, ještě zajímavějším parametrem je dosahovaná výrobní produktivita a s ní spojené ekonomické hledisko. Proto bylo po stanovení navýšení efektivity vyfukovacího procesu při aplikaci CO₂ interního chlazení dále experimentálně zjištěno také navýšení produktivity výroby a provedeno ekonomické zhodnocení. Pro vzájemnou porovnatelnost dosahovaných výsledků bylo rovněž v tomto případě využito procentuální vyjádření délky injektáže korespondující s celkovou periodou chlazení vyfukovacího procesu. Výsledky navýšení produktivity jsou uvedeny v tabulce 29. U 30 ml produktu bylo maximálně získáno 25 % navýšení produktivity výroby při injektáži CO₂ v periodě korespondující 15 % celkové doby chlazení. Další zkracování procesu již nebylo vzhledem ke konstrukčním limitům stroje GM 251 možné (otáčky šneku, strojní časy). Výrobní maximum 0,3 litrového produktu, navýšení produktivity o 34 %, bylo nalezeno při injektáži CO₂ korespondující 30 % celkové doby chlazení. Pro 0,5 litrovou lahev se jednalo o 43 % zefektivnění procesu při dávce CO₂ odpovídající 50 % doby chlazení. Jak již bylo uvedeno, dosažená efektivita chlazení nejobjemnějšího produktu byla nejnižší ze zkoumaných produktů, proto i získané zvýšení produkce dosahovalo nejnižších hodnot, 21 % (chladicí varianta C).

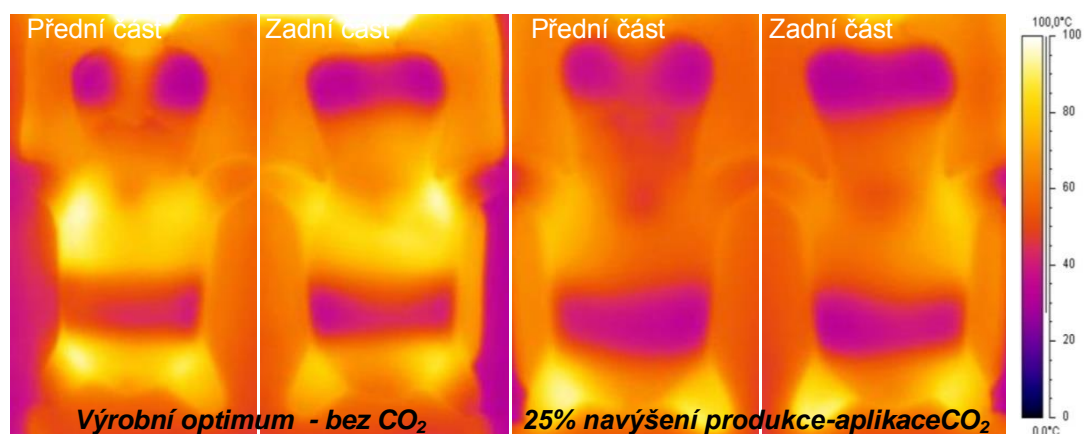
Tab. 29 Dosažené zvýšení produktivity (výrobní maximum)

Zvýšení produktivity při vstřikování CO ₂ v periodě korespondující s % celkové doby chlazení výrobního optima (bez CO ₂)						
Produkt	15%	20% (A)	30%	40%(B)	50%	60% (C)
7l	-	2%	5%	8%	15%	21%
0,5l	-	23%	30%	39%	43%	Limit stroje
0,3l	-	27%	34%	Limit stroje	Limit stroje	Limit stroje
30 ml	25%	Limit stroje	Limit stroje	Limit stroje	Limit stroje	Limit stroje

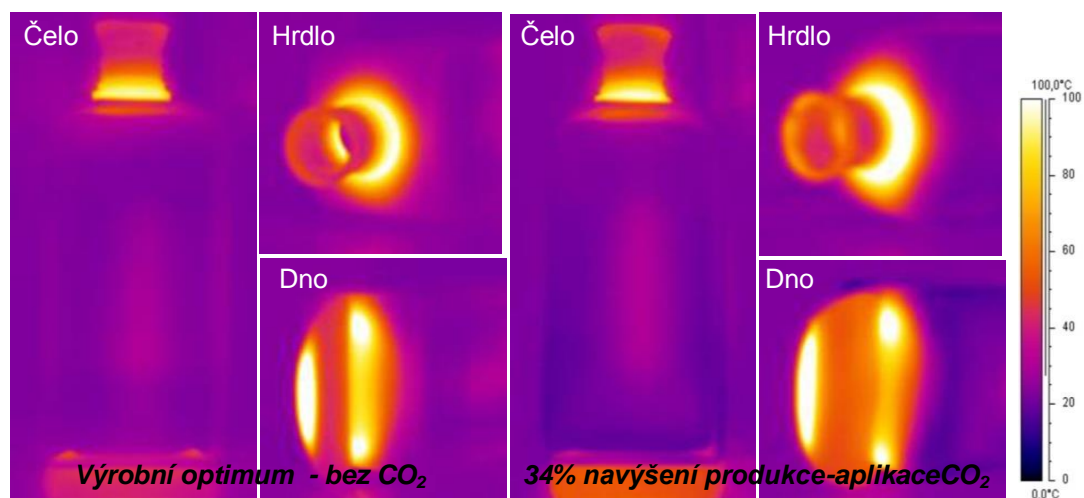
Pro stanovení výrobních limit a míst teplotních extrémů byly rovněž jako v předcházejících případech (kap. 4.4.2) pořízeny a vyhodnoceny termovizní snímky odformovaných produktů. Na obrázcích 129 až 132 jsou porovnány termovizní snímky obou výrobních maxim, tzn. s aplikací a bez aplikace injektáže kapalného oxidu uhličitého. Termovizní snímky výrobních maxim nejmenšího z testovaných produktů, „Hrošíka“, ukazují zřejmé difference. Využití chladicího potenciálu oxidu uhličitého způsobilo zmenšení oblastí, jež dosahují maximálních (kritických) teplot. Oblasti limitující další zvyšování produktivity se nyní lokalizovaly pouze do zadních končetin produktů. Důkazem vysoké teplotní redukce výrobní varianty využívající CO₂ injektáže je, že i po 25 % navýšení produkce vykazovala průměrná teplota povrchu dílů oproti standardní výrobní variantě (bez CO₂) o 8 °C nižší

teploty. Rovněž u dalších produktů, 0,3 litrové a 0,5 litrové lahvičky, je evidentní znatelný pokles povrchových teplot (čelní pohled – pozice 2), a tedy vyšší chladicí potenciál aplikace CO₂ chlazení. Průměrné teploty v těle 0,3 litrové a 0,5 litrové lahvičky klesly při využití CO₂ injekce (0,3 l – 34 %, 0,5 l – 43 % navýšení produkce) o 5 °C, respektive 4 °C. Limitujícími místy obou produktů zůstávají hrdlo a dno. Při porovnání termovizních snímků obou výrobních maxim 7 litrového produktu je zřejmé, že v důsledku vysoké efektivity chlazení v oblasti hrdla a nízké efektivity v oblasti dna se kritickým místem výrobní varianty, využívající chladicího potenciálu oxidu uhličitého, omezující další zvyšování produktivity, stává pouze oblast dna produktu. Průměrná teplota v oblasti hrdla dosahovala u CO₂ výrobního maxima (21% navýšení produktivity) o 10°C nižší hodnoty, než tomu bylo v případě klasického výrobní varianty.

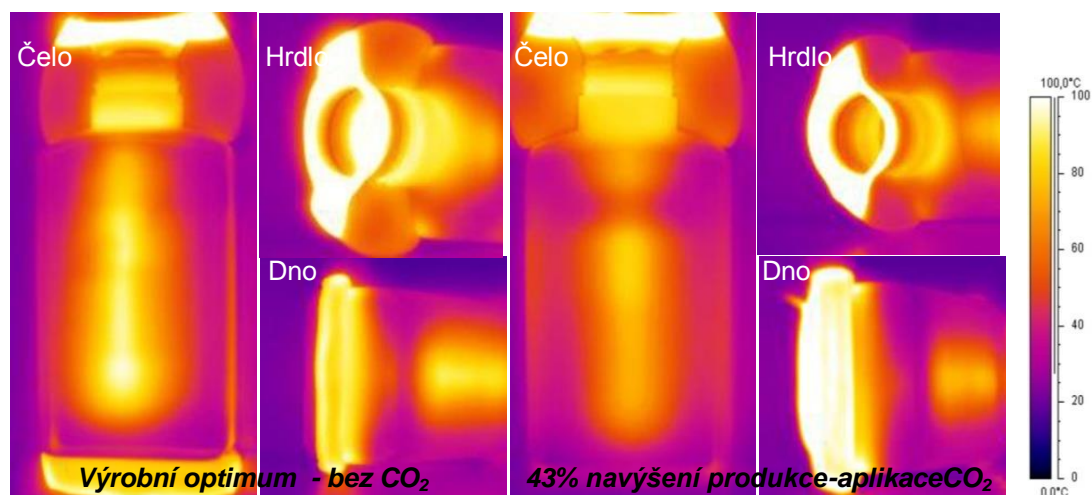
Z výše uvedeného je zřejmé, že CO₂ způsob interního chlazení by mohl zajistit dosažení ještě vyšších výrobních produktivit. Nicméně v testovaných výrobcích stále zůstávají místa zamezující dosažení těchto stavů.



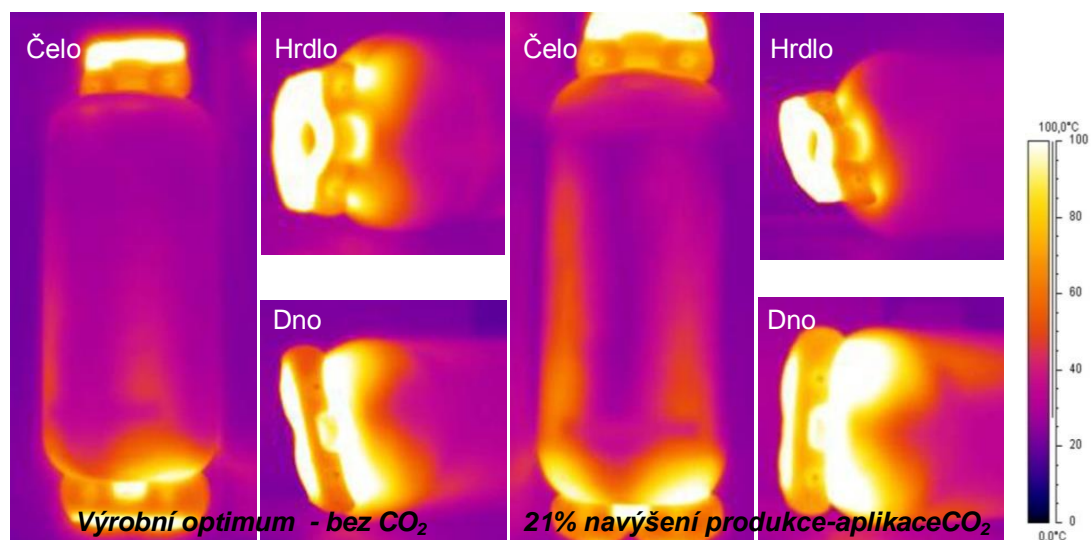
Obr. 129 Termovizní snímky výrobních maxim klasické produkce a produkce využívající chladicího potenciálu CO₂ nejmenšího z testovaných produktů – „Hrošíka“



Obr. 130 Termovizní snímky výrobních maxim klasické produkce a produkce využívající chladicího potenciálu CO₂ 0,3l „lahvičky“

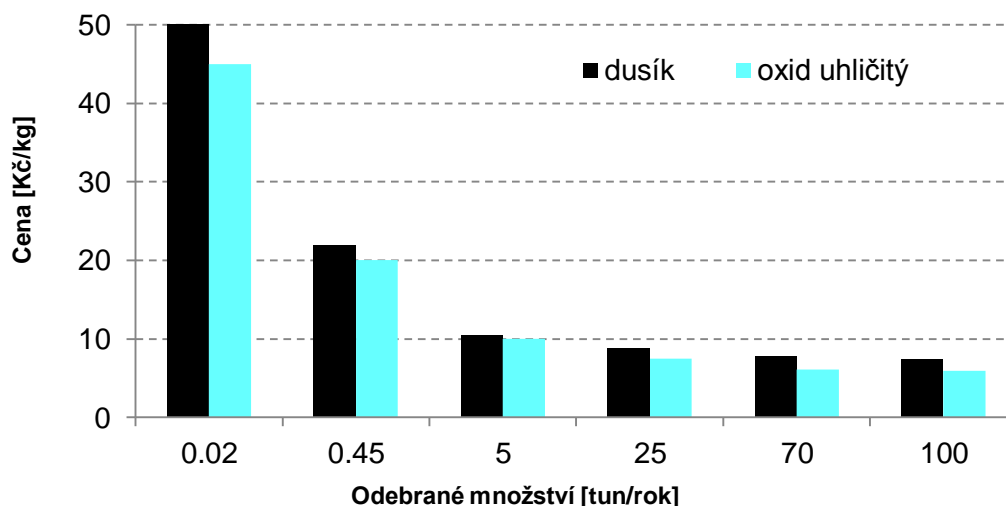


Obr. 131 Termovizní snímky výrobních maxim klasické produkce a produkce využívající chladicího potenciálu CO₂ 0,5l „lahvičky“



Obr. 132 Termovizní snímky výrobních maxim klasické produkce a produkce využívající chladicího potenciálu CO₂ 7l „kontejner“

Pravděpodobně nejdůležitějším aspektem, který rozhoduje o využitelnosti zkoumané metody chlazení, je finanční stránka věci. Pro posouzení aplikovatelnosti testovaného CO₂ temperačního systému byla provedena zjednodušená finanční analýza, do které byly zahrnuty pouze přímé náklady výroby, tzn. ceny energií výrobního zařízení, ceny spotřebovaného polymerního materiálu a interního chladicího média. Pro výpočtový model byly použity celostátně průměrné hodnoty cen energií, platné v České republice pro dané období (duben 2014). V souvislosti s cenou zkapalněných plynů (CO₂ a N) je nutno upozornit na skutečnost, že jejich cena silně závisí na odebíraném množství. Například odebíráme-li více jak 70 tun média za rok, je cena téměř osmkrát nižší než v případě, kdy odebíráme pouze několik kilogramů plynu, viz obr. 133.



Obr. 133 Závislost ceny 1kg CO₂ a N₂ na odebíraném ročním množství

Tab. 30 Vypočtená výrobní cena 1ks produktu při ceně CO₂ 5,9 Kč/kg společně s měsíční a roční úsporou pracovních dní spojenou s max. navýšením produkce

Výrobní cena na produkt [Kč]	Klasický proces	Interní chlazení
30ml „Hrošík“ [Kč]	0,768	0,727
0,3l „lahvička“ [Kč]	1,279	1,303
0,5l „lahvička“ [Kč]	2,132	2,148
7l „kontejner“ [Kč]	19,0704	21,074
Úspora pracovních dnů - 24h výroba	Za měsíc	Za rok
30ml „Hrošík“ (25% navýšení produkce)	5 dní	63 dní
0,3l „lahvička“ (34% navýšení produkce)	7 dní	84 dní
0,5l „lahvička“ (43% navýšení produkce)	9 dní	109 dní
7l „kontejner“ (21% navýšení produkce)	4 dní	54 dní

Z výsledků finančního rozboru (tabulka 30) se vzhledem k množství použitého média jeví jako finančně rentabilní pouze výrobní varianta produkce nejmenšího z testovaných produktů – „Hrošíka“. Důvodem je dosažení vysoké efektivity chlazení při nízké spotřebě CO₂. Náklady spojené s vyšším množstvím použitého chladicího média ostatních testovaných produktů zapříčiňují, že výrobní cena jednoho kusu je u interní chladicí varianty vždy vyšší než u klasického vyfukovacího procesu a výsledná produkce se tedy i přes její nárůst produktivity jeví jako negativní. Příklad výpočtového modelu pro 30 ml produkt „Hrošík“ je představen v tabulce 31. Při nejnižší ceně CO₂ (5,9 Kč/ kg), odpovídající odběru minimálně 100 tun za rok, je stanoven denní profit z interního chlazení aplikovaného na jednom vyfukovacím stroji 293 Kč (24 hodinová produkce). Finanční návratnost systému činí 103 dnů. Při

odběru pouze 5 tun za rok, a tedy ceně plynu 10 Kč/ kg, denní profit klesne na 205 Kč a návratnost systému se prodlouží o 43 dní. Je-li aplikován CO₂ interní chladič systém, dosahované maximální navýšení produktivity zkrátí měsíční výrobu u produktu „Hrošíka“ o 5 dní a u roční dokonce o 63 dní, u 0,3 litrové a 0,5 litrové lahvičky se jedná o 7 a 9 dní v měsíci (84 a 109 dní za rok). U 7 l kontejneru se jedná o úsporu 4 pracovních dní v měsíci, 54 dní v roční produkci. Přestože z finanční kalkulace porovnáním přímých nákladů plyne, že testovaný CO₂ systém nepřináší pro produkty středních a velkých objemů (0,3 l, 0,5 l lahvičky a 7 l kontejner) finanční úsporu, může právě tento parametr zaručit určitá zvýhodnění (plat zaměstnance, provozní režie, atd.), jelikož stroj lze v daný čas využít k další produkci.

Tab. 31 Finanční kalkulace 30 ml produktu „Hrošík“

30 ml produkt – „Hrošík“	Klasický proces	Interní chlazení	
Čas chlazení [s]	10	6,5	
Celkový čas cyklu [s]	16	12	
Produkce za hodina [ks]	225	300	
Zvýšení produkce [%]	-	25	
Hodinová cena práce stroje [Kč]	27,3	27,3	
Náklady na pracovníka [Kč]	-	-	
Denní produkce [h]	24	24	
Váha produktu [g]	20,21	19,34	
Cena materiálu za 1 kg [Kč]	32	32	
Cena materiálu 1 produktu [Kč]	0,647	0,619	
Čas injektáže CO ₂ [s]	-	1,5	
Množství použitého CO ₂ [g]	-	2,97	
Cena 1 kg CO ₂ [Kč]	-	5,9	10
Výrobní cena za h [Kč]	172,8	218,2	221,9
Denní výrobní cena [Kč]	4147,0	5236,8	5324,5
Výrobní cena na produkt [Kč]	0,768	0,727	0,739
Denní profit z interního chlazení [Kč]	-	292,5	204,8
Investiční náklady [Kč]	-	30 000	30 000
Návratnost [dny]	-	103	146
Úspora pracovních dnů za měsíc [dny]	-	5	
Úspora pracovních dnů za rok [dny]	-	63	

6 OPTIMALIZACE PROCESU INTERNÍHO CHLAZENÍ INJEKTÁŽÍ CO₂

Z posouzení aplikovatelnosti interního chlazení oxidem uhličitým, které bylo testováno na zařízení společnosti Linde a.s., vyplývá, že technologie injektáže kapalného CO₂ by mohla dosáhnout ještě zajímavějších výsledků. Technologická omezení vyfukovacích strojů společně s produkčně kritickými místy (místa teplotních extrémů) však neumožňují jejich dosažení. Další úsilí bylo proto zaměřeno na odstranění těchto limit. Pro splnění vytýčeného úkolu byly provedeny následující optimalizace:

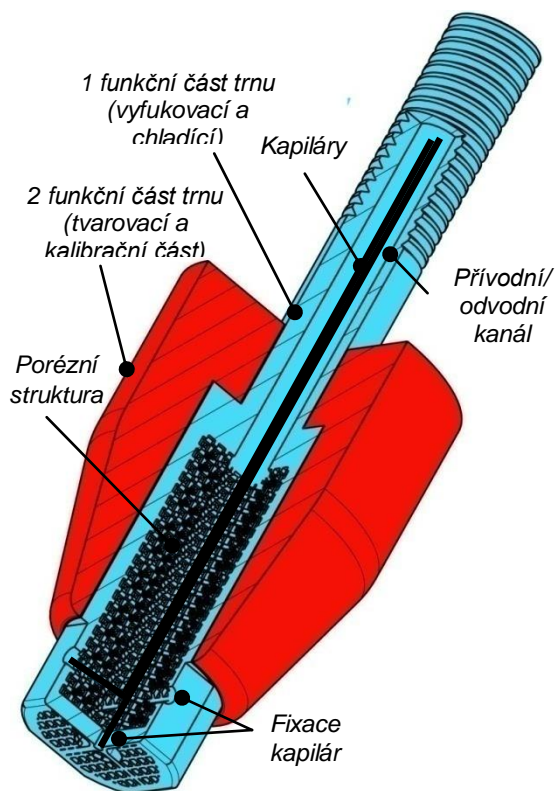
- Konstrukční optimalizace vyfukovacího trnu
- Inovace temperační jednotky vstřikující zkapalněné plyny
- Integrace inovované temperační jednotky vstřikující zkapalněné plyny do extruzního vyfukovacího stoje

6.1 Konstrukční optimalizace vyfukovacího trnu

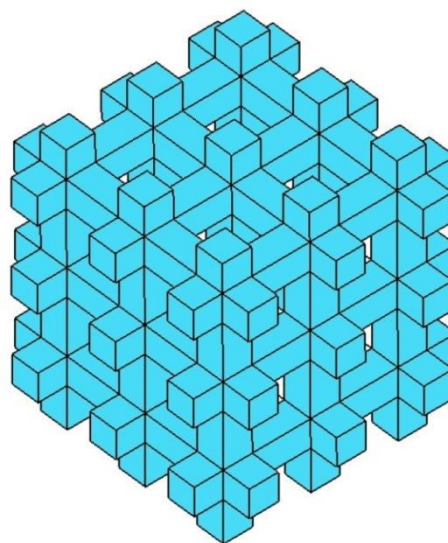
Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.2, nejběžnější a nejsnazší způsob přívodu zkapalněného chladicího média (CO₂, N) do expanzního prostoru je pomocí tenkých kapilár o vnějším průměru 1,6 mm a jmenovité světlosti 0,5 mm, vedených vnitřkem vyfukovacího a kalibračního trnu (příloha 4 práce). Ústí kapilár je pro zajištění maximálního chladicího efektu zpravidla rovnoběžné s ústím kalibračního trnu, čímž je zároveň vymezen prostor pro odvod expandovaného média. Výhodou stávajícího řešení je poměrně jednoduchá implementace, využitelná pro širokou škálu typů vyfukovacích a kalibračních trnů. Naopak, za nevýhody stávajícího řešení lze považovat nemožnost polohování kapiláry v jiném směru než rovnoběžném s osou kalibračního trnu. Dle detekovaných chladících charakteristik (kapitola 4.4.1) dopadá injektované médium primárně do spodních oblastí produktů, kde odebírá největší část své tepelné energie. Stávající řešení kalibračních trnů tedy neumožňuje lokalizaci chlazení do problematických míst, míst teplotních extrémů, které se nacházejí v oblasti krčku produktu. Jelikož navíc kapilára není v ústí trnu žádným způsobem fixována, velmi často dochází k jejímu vychýlení z předdefinované polohy. Vychýlení kapiláry následně může zapříčinit nerovnoměrné chlazení, vznik oblastí s intenzivnějším teplotním odvodem a v krajním případě i negativní ovlivnění kvality produktu (vnitřní pnutí, deformace).

6.1.1 Inovativní řešení kalibračního trnu

Výše uvedené nevýhody odstraňuje předložené řešení, jehož podstata spočívá v rozdělení kalibračního trnu do dvou vzájemně rozebíratelných funkčních částí. První funkční částí, která je rozhodující pro dosahovanou efektivitu interního chlazení, je jádro trnu. Jádro trnu je tvarově uzpůsobené snadné implementaci a fixaci kapilár. Kapilára může být dle potřeby volitelně ustavena jak ve směru rovnoběžném s osou kalibračního trnu, tak ve směru kolmém na tuto osu i pod libovolným úhlem. Lokalizace kapilár umožňuje dosažení rovnoměrného interního chlazení všech teplotně kritických oblastí vyfukovaných produktů. Odvod chladicího média je zajištěn středovou oblastí trnu, která je zčásti tvořená porézní strukturou - pravidelně opakující se prostorové útvary. Porezita ve struktuře zapříčiňuje zachycování unášených (odváděných) atomizovaných částí expandujícího média, které nepředaly tepelnou energii chlazenému objektu. Atomizované krystalky oxidu uhličitého narážejí na prostorové útvary porézní struktury, kde tají a předávají svou tepelnou energii. Výsledkem je zvýšení chladících schopností trnu a vyšší využití chladicího potenciálu CO₂. Druhá funkční část trnu, rozhodující o kvalitě tvaru hrdla, je tvořena kalibrační částí. Jelikož každý produkt má v oblasti hrdla svá geometrická specifika, jsou obě části trnu jednoduše demontovatelné. Demontovatelnost obou částí trnů pak umožňuje využití první funkční části trnu (jádra trnu) pro více typů produktu, tzn. variovaným prvkem je pouze kalibrační část trnu.



Obr. 134 Inovované konstrukční řešení kalibračního trnu



Obr. 135 Porézní struktura interní části kalibračního trnu

6.1.2 Realizace řešení

Detailní konstrukční řešení navrženého způsobu optimalizace kalibračního trnu je zobrazeno na obrázku 134 a v příloze 5 práce. Jak již bylo předestřeno, kalibrační trn se sestává ze dvou vzájemně demontovatelných funkčních částí. Funkční části 1, která vymezuje kvalitu tepelné výměny a funkční části 2, jež zajišťuje vytvarování a kalibraci hrdla produktu. Jejich vzájemné ustavení je v radiálním směru trnu zajištěno válcovitým tvarem obou funkčních částí a v axiálním směru trnu osazením. Připojení sestaveného trnu k výrobnímu zařízení (vyfukovacímu trnu stroje) je uskutečněno pomocí metrického závitu umístěného na konci první funkční části trnu. Aretace mezi oběma strojními součástmi a zároveň mezi oběma funkčními částmi trnu je docílena vzájemným dotažením součástí (metrický závit), vymezením nulové mezery (vůle) mezi vyfukovacím trnem stroje a dosedací plochou kalibrační funkční částí trnu 2. Pro snadné sestavení, aretaci a demontovatelnost trnu k vyfukovacímu zařízení je vnější tvar funkční části trnu 1 v oblasti jeho ústí geometricky uzpůsoben (čtvercový tvar hlavy) pro aplikaci běžných montážních nástrojů, jakými jsou například klíč ploché. Vnitřní oblast funkční části 1 v této lokaci zajišťuje jednak přívod a odvod standardního tlakového průmyslového vzduchu, jednak přívod a odvod CO₂ přiváděného do expanzního prostoru pomocí kapilár. Kapiláry mohou být, dle výrobních charakteristik chlazeného produktu, volitelně umísťovány ve směru rovnoběžném s osou trnu, ve směru kolmém na tento směr a díky jejich snadné tvarovatelnosti i pod určitým úhlem. Fixace středové pozice kapiláry je ve směru rovnoběžném s osou trnu zajištěna pomocí čtyřramenného tvarového uchycení s vnitřním otvorem o průměru odpovídajícímu vnějšímu průměru kapiláry. Fixace kapiláry v této pozici zajišťuje dosažení rovnoměrného chlazení spodních lokací produktu. Ustavení kapilár ve směru kolmém na osu trnu, a tedy zvýšení intenzity odvodu tepelné energie v dalším produkčně limitním místě - oblasti hrdla, zajišťují čtyři otvory vedoucí z vnitřního rozhraní trnu 1 až na povrch jeho tvarově uzpůsobených montážních částí. Rozdíly mezi vnitřním průměrem těchto otvorů a vnějším průměrem kapilár umožňují aplikaci kapilár pod zvoleným úhlem. Vnitřní rozhraní funkční části trnu 1 je zčásti tvořeno porézní strukturou (pravidelně se opakujícími se útvary), která díky zachycování odváděných atomizovaných částí expandujícího oxidu uhličitého zvyšuje chladicí účinnost trnu v kalibrační oblasti hrdla funkční částí trnu 2. Detailní pohled na porézní strukturu, sestávající z pravidelně se opakujících útvarů tvaru kříže, je představen na obrázku 135. Z hlediska procentuálního zastoupení porézní struktury ve funkční části trnu 1 jsou limitujícími parametry dostatečná konstrukční tuhost trnu a dostatečný prostor pro přívod a odvod tlakového vzduchu. Pro zajištění

dostatečné tuhosti funkční části 1 trnu neklesá tloušťka stěny vnějšího obalu (neporézního materiálu) v žádném místě pod 1 mm. Pro optimální přívod, respektive odvod tlakového vzduchu je zachován minimální průměr vnitřního kanálu 3 mm. Demotovatelná tvarovací funkční část trnu 2 obsahuje předtvarovací a dokončovací neboli kalibrační oblasti, které jsou geometricky variabilní dle konstrukčních dispozic tvarovaného hrdla produktu.

Z představeného konstrukčního řešení je zřejmé, že realizace funkční části trnu 1 není možná běžným způsobem třískového obrábění. Proto byla pro výrobu prototypového dílu použita technologie „Direct Metal Laser Sintering“ (DMLS), představená v kapitole 3.1.1. Z nabízených variací materiálů [13] byl zvolen materiál s nejvyšší tepelnou vodivostí, DM20. Jedná se o materiál obsahující matici na základu bronzu s příměsí niklu. Mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu DM20 jsou uvedeny v tabulce 32. Realizace funkční části trnu 2, funkční části zajišťující vytvarování a kalibraci hrdla produktu, již byla provedena běžným způsobem. Rovněž zde byl za cílem dosažení maximálního chladicího efektu zvolen materiál s co nejvyšší tepelnou vodivostí. Z široké škály nabízených materiálů byl vybrán materiál AMPCOLOY 940. Jedná se vysoko-legovanou slitinu mědi (Ni, Si, Cr), která v sobě kombinuje vysokou tepelnou a elektrickou vodivost s dobrými mechanickými vlastnostmi (tabulka 32).

Tab. 32 Mechanické a fyzikální vlastnosti vybraných materiálů obou částí trnů

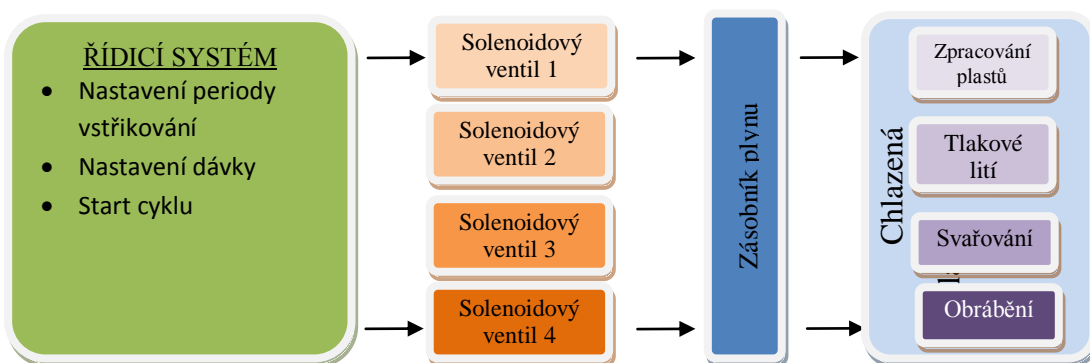
Materiál	DM20	AMPCOLOY 940
Hustota	7,6 g/cm ³	8,71 g/cm ³
Mez pevnosti v tahu	400 MPa	662 MPa
Mez kluzu v tahu	200 MPa	510 MPa
Tahový modul	80 000 MPa	131 000 MPa
Tvrdost (bez povrchové úpravy)	110 HB, 115 HV	95 HBV
Tepelná vodivost	30 W/m.K	208 W/m.K

6.1.3 Průmyslová využitelnost

Představený kalibrační trn vytváří univerzální způsob zefektivnění procesu interního chlazení pomocí injektáže zkapalněných plynů jako je oxid uhličitý a dusík. Kalibrační trn umožňuje zvýšení intenzity odvodu tepelné energie ve všech problematických lokacích produktů, místech teplotních extrémů, což v přímém důsledku zajišťuje dosažení homogenního teplotního pole produktu. Z procesního hlediska inovace ve způsobu CO₂ interního chlazení způsobí zkrácení doby chlazení a tím zvýšení výrobního taktu s pozitivním dopadem na kvalitu výrobků. Kalibrační trn je aplikovatelný pro všechny typy extruzně vyfukovaných polymerních produktů.

6.2. Inovace temperační jednotky vstřikující zkapalněné plyny

Cílem této části práce bylo, s přihlédnutím k provedenému teoretickému rozboru a dosaženým experimentálním výsledkům, vyvinutí nového řešení temperační jednotky vstřikující zkapalněné plyny za účelem zefektivnění procesu temperace výrobních nástrojů (viz příloha 6 práce). V současnosti již na trhu existuje více nekonvenčních temperačních systémů (kapitola 3.2), které buďto přímo nahrazují nebo doplňují konvenční způsoby chlazení výrobních nástrojů. Nicméně tato zařízení umožňují pouze nastavit proces chlazení z hlediska časového, tj. start cyklu a velikost dávky (obr. 136). Zařízení tedy slouží čistě k iniciaci a dopravě média do chlazeného nástroje, což uživateli nepřináší žádné informace o probíhajících dějích tepelné výměny a tedy o efektivitě chlazení aktuálního nastavení.



Obr. 136 Schéma funkčnosti stávajících interních temperačních systémů

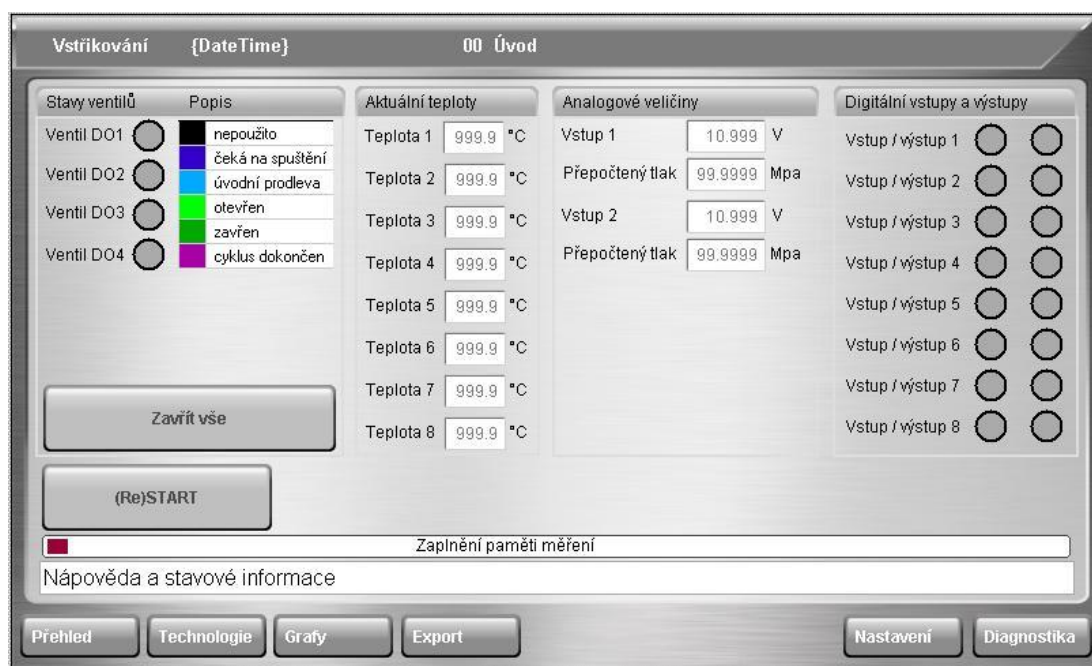
6.2.1 Inovativní řešení temperační jednotky

Inovativní řešení temperační jednotky spočívá ve způsobu řízení systému. Běžně používaná zařízení umožňují pouze nastavení procesu přívodu média do expanzního prostoru nastavením počátku, délky a periodicity vstřikování, což nepřináší uživateli žádné informace o správnosti aktuálního nastavení. Tyto temperační systémy navíc slouží pouze k přívodu jednoho média a neumožňují kombinaci více chladících médií. Inovace v chlazení zkapalněnými plyny proto spočívá ve vytvoření nového rozhraní, které umožňuje nastavení libovolné kombinace sekvence vstřikování více chladících médií použitých v rámci jednoho výrobního cyklu, a současném přivedení a zobrazení zpětné vazby od základních ukazatelů tepelné výměny (obrázek 137). Uživatel tak může snadno a přehledně kontrolovat, případně optimalizovat procesní nastavení a maximálně tak využít chladicího potenciálu použitého plynu, což kladně ovlivňuje i ekonomičnost celého procesu chlazení. Zpětná vazba je zajištěna pomocí implementace konvenčních teplotně-tlakových senzorů, které jsou umísťovány do expanzního prostoru a také těla chlazeného nástroje.



Realizaci temperační jednotky vstřikující zkapalněné plyny lze rozdělit na hardwarovou a softwarovou část. Hardwarová soustava se skládá z řídicí jednotky a standardizovaných prvků, kterými jsou tlakové rozvodové hadice, kapiláry a dvoucestné elektromagnetické solenoidové ventily (9W ventil Parker Lucifer). Nejdůležitější částí celého systému je řídicí jednotka. Základem řídicí jednotky je výkonné vícetaskové PLC, které vyhodnocuje vstupy a nastavuje výstupy dle požadavku uživatele. Další vrstvou řídicího programu je přehledná vizualizace, která slouží jak k nastavení technologie, tak k zobrazení aktuálních procesních dat. To se děje prostřednictvím 7" dotykového terminálového panelu (zobrazení výsledků). Stávající konfigurace dovoluje vyhodnocovat až 8 digitálních vstupů a řídit 4 elektromagnetické ventily. Další 4 výstupy slouží k zrcadlení ovládacích prvků ventilů pro vyšší řídicí či měřicí systémy. Každý ventil má vlastní nastavení časování, kde lze nastavit spouštěcí signál, ten může být realizován libovolným digitálním vstupem, či dokončením předchozí sekvence. Systém je tak flexibilní a dovoluje zřetězení či paralelizaci řízení. Pro vlastní měření procesních dat je připraveno rozhraní pro 6 termočlánků typu K, s rozlišením 0,1 °C a samozřejmě s kompenzací studeného konce. Pro měření analogových veličin (tlaků) je systém vybaven 2 vstupy s napětovým rozsahem $\pm 10V$, který je digitalizován pomocí 16 bit převodníku. Výhodou je také nezávislé napájení analogových snímačů, a tedy prevence problémů elektromagnetickým rušením. Samozřejmostí je kontinuální sběr dat a uložení do souboru pro pozdější zpracování a případné diagnostické účely technologického procesu. Perioda ukládání dat je 20 Hz.

Vlastní vizualizace softwarové realizace temperační jednotky se skládá z několika obrazovek, které můžeme rozdělit na ovládací, nastavovací a informační. Ovládací rozhraní slouží k ovládání systému, poskytuje rychlou informaci o aktuálních stavech. Nastavovací obrazovky slouží k nastavení časování a analogových vstupů a teplot. Informační rozhraní dovoluje zobrazení vybraných dat v grafu. Na obrázku 138 je znázorněn příklad řešení ovládacího rozhraní. Zbýlé vizualizace softwarové realizace je možné vidět v příloze této práce (příloha 7 a 8).



Obr. 138 Vizualizace realizace ovládacího rozhraní temperační jednotky

6.2.3 Průmyslová využitelnost

Úkolem této části práce bylo vytvoření inovativního řešení temperační jednotky vstřikující zkapalněné plyny, jako oxid uhličitý a dusík, do chlazených míst výrobních nástrojů. Oproti stávajícím způsobům chlazení je hlavní výhodou předkládaného řešení možnost progresivního řízení, které umožňuje vzájemnou kombinaci více chladících médií a zároveň monitorizaci procesních parametrů chlazení. Rovněž tak nabízí okamžitý přehled o probíhajících teplotních dějích přímo v řídicím rozhraní temperační jednotky a možnost okamžité optimalizace procesu. Variabilita nastavitelnosti procesu zahrnující aplikovatelnost kombinace chladících médií dále umožňuje dosáhnout smysluplného zvýšení efektivity chlazení nástroje a tím zvýšení výrobního taktu při současném snížení provozních nákladů. Systém je možné využít pro všechny technologie, ve kterých je zapotřebí intenzivního lokálního odvodu tepelné energie. Kromě technologií zpracovávajících polymerní materiály (vyfukování, vstřikování) se jeví jako další aplikačně vhodné technologie například tlakové lití, svařování či obrábění.

6.3 Integrace inovované temperační jednotky vstřikující zkapalněné plyny do extruzního vyfukovacího stroje

Po realizaci temperační jednotky byla dalším úkolem práce její integrace do běžného extruzně vyfukovacího zařízení. Z provedené rešerše je zřejmé, že technologie interního chlazení procesu vyfukování dutých výrobků není novinkou. Nicméně je nutné podotknout, že v současnosti nejsou k dispozici temperační jednotky, které je možno snadno integrovat do vyfukovacích strojů pro zpracování plastů. Existují pouze externí samostatně řízená zařízení. Připojení těchto systémů do zpracovatelského procesu vyžaduje vytvoření vlastního komunikačního rozhraní mezi strojem a řídicí jednotkou temperačního zařízení, instalaci aktivních členů pro přívod zkapalněného média, nastavení technologických parametrů vstřikování média na externím zařízení. Výhodou stávajícího konvenčního řešení je univerzálnost externího zařízení umožňující aplikaci i pro jiné technologické procesy, jako vstřikování, vytlačování, obrábění, svařování a tlakové lití. Naopak za nevýhodu lze považovat nutnost dodatečné instalace komponent externího systému a zvýšené nároky na prostorové uspořádání. V současných temperačních systémech chybí možnost vícesekvenčního řízení vstřikování chladicího média v kombinaci se standardním médiem pro vyfukování, se vzduchem. Jelikož zde neexistuje zpětná vazba od parametrů tepelné výměny probíhající v dutině formy, není možné získat komplexní informace o efektivitě chlazení, z čehož také plyne zvýšená spotřeba chladicího média použitého pro interní chlazení. Navíc je nutná komunikace a řízení technologie externího a interního chlazení pomocí dvou nezávislých ovládacích systémů.

6.3.1 Inovované řešení

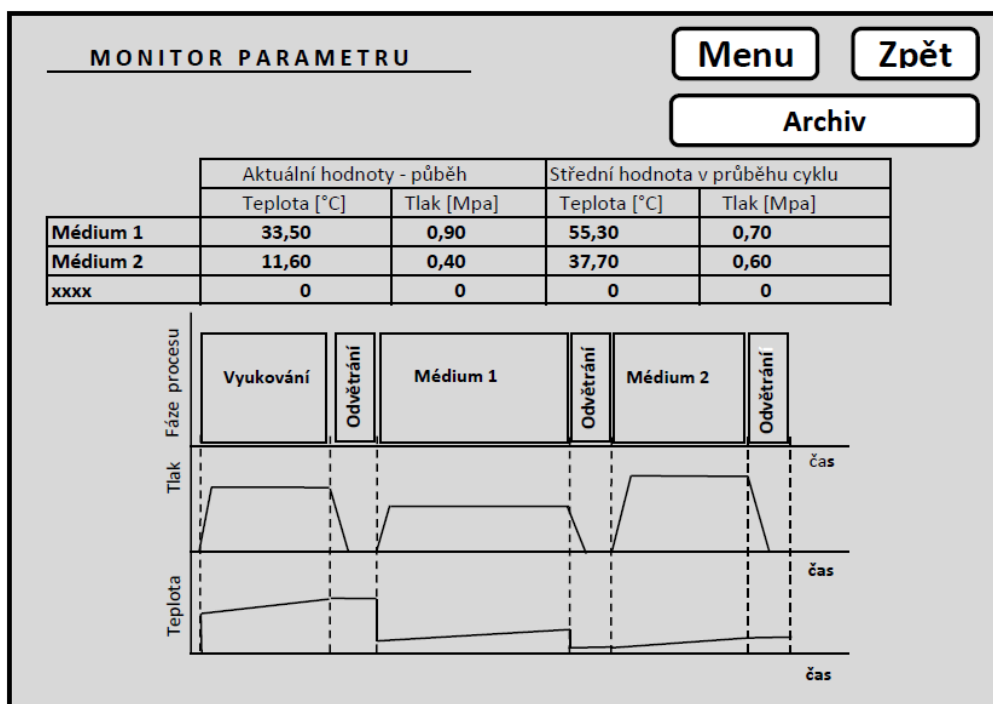
Novost řešení spočívá ve vytvoření komplexního extruzního vyfukovacího zařízení s možností využití nekonvenčních způsobů chlazení. Do vyfukovacího stroje je současně implementováno jak řízení temperačního systému, tak i ostatní elementy nezbytné k zajištění přívodu plynů do vnitřních prostor dutých výrobků - zásobníky chladících médií, solenoidové ventily a tlakové rozvody. V PLC ovládání vyfukovacího stroje je vytvořeno nové rozhraní, které umožňuje uživateli aplikovat kombinaci běžně používaných médií (vzduchu) s chladícími médii o vyšší efektivitě. Do pneumatické větve a kalibračního trnu jsou umístěny teplotně tlakové senzory. Výstupy z těchto senzorů jsou monitorizovány v ovládacím rozhraní stroje. Díky této zpětné vazbě získá uživatel přímou odezvu od probíhajících dějů tepelné výměny v dutině formy a může tak snadno optimalizovat proces chlazení pomocí nově nastavených variací dávek injektáže aplikovaných médií a doby odvětrání.

6.3.2 Realizace řešení

Pro realizaci integrace temperačního systému vstřikující zkapalněné plyny do produkčního zařízení zhotovující duté polymerní produkty byl vybrán extruzní vyfukovací stroj GM 5000 společnosti GDK spol. s r.o. Realizaci prototypového vyfukovacího stroje s integrovaným CO₂ temperačním systémem lze opět rozdělit na hardwarovou a softwarovou část. Softwarová integrace spočívá ve vytvoření nového ovládacího rozhraní v PLC řízení extruzního vyfukovacího stroje umožňujícího inovovaný způsob řízení chladicího procesu. Pomocí vytvořeného rozhraní, znázorněno na obrázku 139, lze s použitím dotykového displeje a zobrazené klávesnice nastavit jak parametry tvarování produktu, čili vyfukování, tak i chlazení. Při načtení této stránky se zobrazí tři základní nastavitelné oblasti: vyfukování, chlazení pomocí média 1 a chlazení pomocí média 2. Ve všech oblastech je možno zvolit dobu zpoždění vyfukování/ injecktáže média, dále délku vyfukování, chlazení a délku odvětrávání. Obrazovka obsahuje standardní tlačítka pro editaci či potvrzení vkládaných hodnot jako „Menu“, „Zpět“, „Monitor parametrů“, „Další“, „Zruš“, „Potvrď“. Jednotlivé časové sekvence procesu vyfukování a chlazení mohou na sebe buďto navazovat nebo jejich počátek může být přímo zadán do systému prostřednictvím času „Zpoždění“, který udává hodnotu (v sekundách) počítanou od doby počátku pohybu vyfukovacího trnu směrem do formy. Hodnota „Doba“ udává v sekundách délku časového intervalu pro přívod chladicího média. Čas „Odvětrání“ pak umožní vyprázdnění dutiny výrobku před další chladicí fází, eventuálně otevřením formy.

Technologické údaje - Časy mechanismů - VYFUKOVÁNÍ/ CHLAZENÍ		
Vyfukování	- Zpoždění	0,30
	- Doba	2,10
	- Odvětrávání	1,50
Médium 1	- Zpoždění	7,10
	- Doba	2,70
	- Odvětrávání	1,00
Médium 2	- Zpoždění	1,00
	- Doba	5,00
	- Odvětrávání	1,00

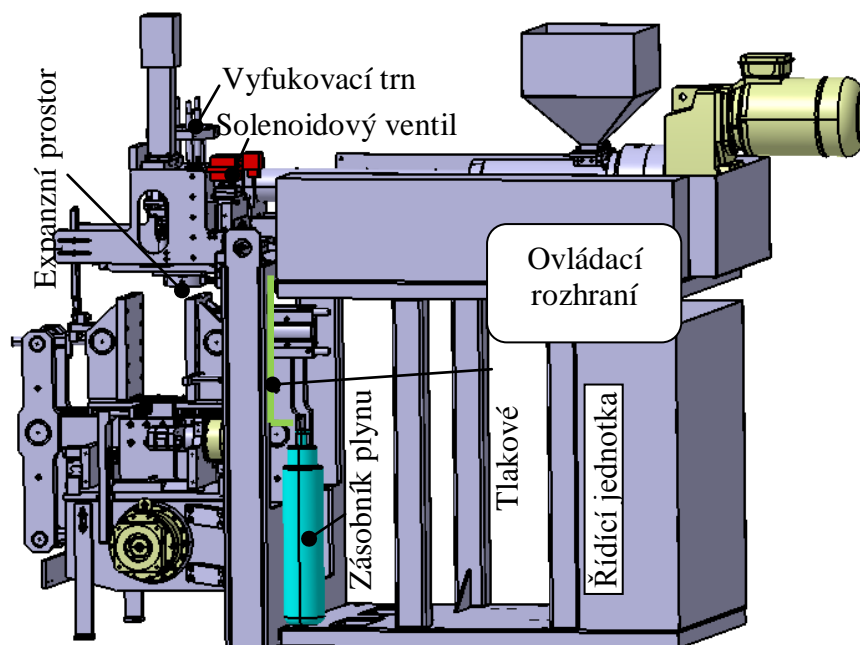
Obr. 139 Ovládací rozhraní PLC řízení extruzního vyfukovacího stroje GM 5000



Obr. 140 Systémová obrazovka se znázorněním zpětné vazby od teplotně tlakových senzorů

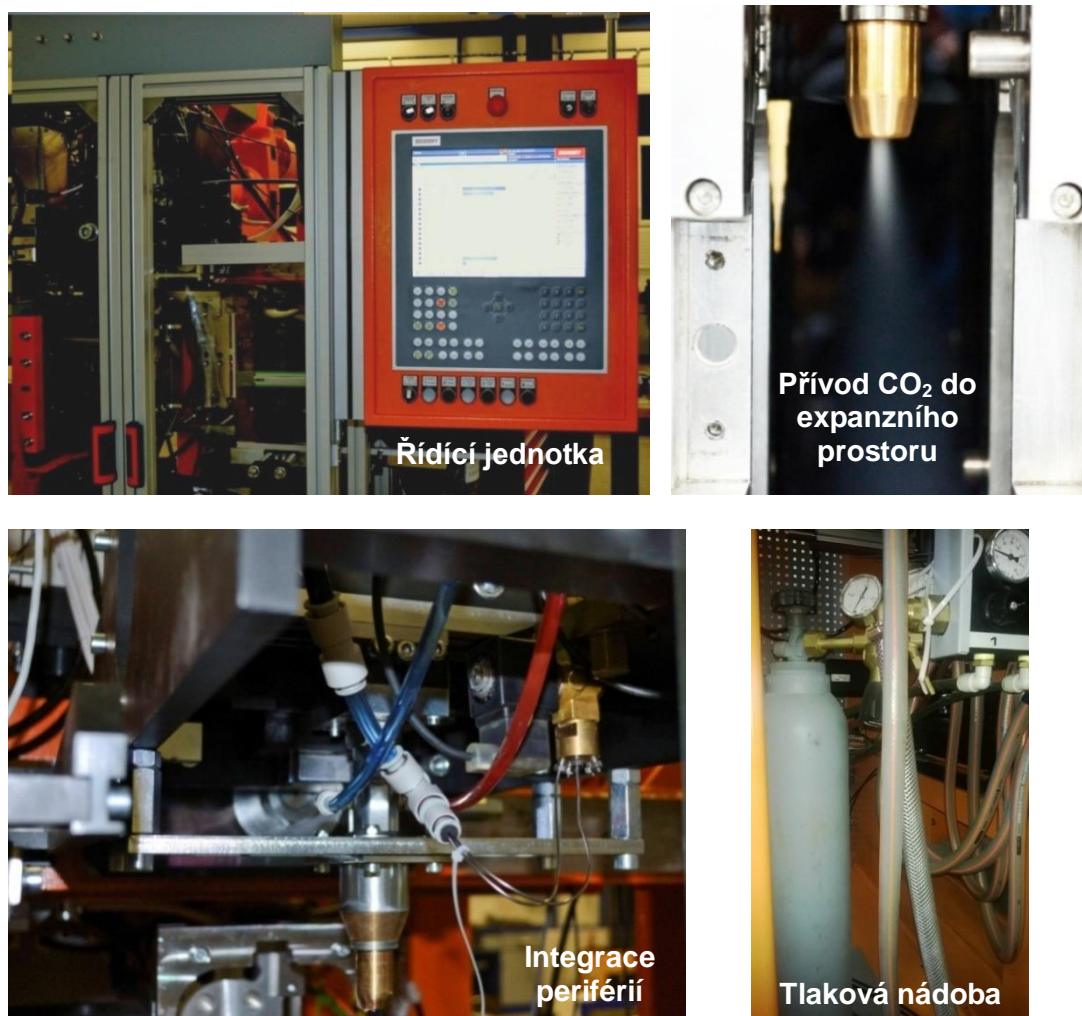
Inovované integrované řízení fáze chlazení do PLC řídicího systému vyfukovacího stroje umožňuje nejen sekvenční zadání jednotlivých intervalů chlazení a volbu chladicího média, ale také monitorizaci technologických parametrů chladicího média přiváděného a odváděného do dutiny a z dutiny formy, a tím posoudit účinnost přestupu tepla mezi chlazeným výrobkem a chladícím médiem. Sledování hodnot procesních veličin, teploty a tlaku interního chladicího systému, umožňuje okamžité optimalizování nastavení sekvence dávkování/ odvětrávání a dosažení maximální procesní efektivity. Zobrazení grafické závislosti průběhu teploty/ tlaku chladicího média na čase v rámci jednoho pracovního cyklu (obr. 140) je umožněno po iniciování složky v rozhraní pod názvem „Monitor parametrů“. Zde jsou dle počtu implementovaných senzorů názorně zobrazeny definované závislosti. Monitorizace procesních veličin během fáze chlazení výrobku ve formě může být provedena pomocí běžných teplotních senzorů (např. Cr–Ni termočlánky typu K) a tlakových snímačů. Teplotně tlakové senzory lze díky inovovanému konstrukčnímu řešení kalibračního trnu s výhodnou implementovat přímo do expanzního prostoru, tedy dutiny formy, a detekovat tak kvalitu probíhající tepelné výměny, či umístit do pneumatického okruhu vyfukovacího stroje - větev pro vyfukování/ odvětrávání, což nám přinese cenné informace o míře využití chladicího potenciálu použitého média. Pneumatická větev vyfukovacího zařízení se sestává z redukčního ventilu, který slouží k nastavení vyfukovacího tlaku, elektromagnetického ventilu umožňujícího časové řízení přívodu chladicího média a zároveň otevření cesty pro odvětrání –

vyprázdnění dutiny výrobku. Dále škrtícího ventilu, pomocí něhož je možné nastavit úroveň průtoku vyfukovacího/ chladicího média. Pro umístění teplotně tlakových senzorů je s výhodou zvolena lokace na konci větve, tedy za škrtícím ventilem. Signály ze senzorů jsou následně zpracovány, vyhodnocovány a zobrazovány PLC řídicím systémem stroje.



Obr. 141 Model integrace CO₂ temperační jednotky do stroje GM 5000

Kromě integrace řídicího systému temperační jednotky do interního rozhraní vyfukovacího stroje jsou do konstrukce vyfukovacího agregátu implementovány i hardwarové prvky chladicího systému (viz obrázek 141 a 142), kterými jsou zásobník zkapalného plynu, solenoidové ventily a periférie. Zkapalněný plyn je standardně skladován v tlakových nádobách a v této podobě je také integrován do volných vnitřních prostor vyfukovacího stroje. Lokalizace zásobníku ve vnitřních prostorech umožňuje snadnou implementaci i dalších členů soustavy - vedení periférií (tlakové vedení), které je ukryto v konstrukci stroje a nesnižuje tak operační a manipulační prostor stroje. Dvoucestné elektromagnetické 9W ventily, DZ06 společnosti PARKER jsou pevně uchyceny na pohyblivou jednotku vyfukovacího trnu, čímž je maximálně možné, vzhledem ke konstrukci stroje, zajištěno pravidlo o co nejkratším vedení kapalného CO₂ kapilárou do expanzního prostoru (kapitola 3.2.4), který se nachází v ústí vyfukovacího trnu.



Obr. 142 Integrované prvky CO₂ temperační jednotky do stroje GM 5000

6.3.3 Průmyslová využitelnost

Integrace systému vstřikující zkapalněné plyny do extruzního vyfukovacího stroje vytváří komplexní zařízení navyšující účinnost interního chladicího okruhu procesu. Výsledkem je zkrácení doby cyklu a s tím související zvýšení produktivity technologie vyfukování. Nově vytvořené rozhraní umožňuje kombinaci běžně používaného chladicího média (vzduchu) s progresivnějšími médii, variabilitu nastavení period vstřikování, odvětrávání a zároveň monitorizuje zpětnou vazbu od probíhající tepelné výměny, což umožňuje uživateli optimalizovat chladicí proces s cílem maximalizovat efektivitu chlazení při minimální spotřebě chladicího média. Systém byl primárně vyvinut pro technologii extruzního vyfukování, ale je možné jej efektivně aplikovat také pro varianty vyfukovacího procesu, jako je vstřikovací vyfukování nebo vyfukování s dloužením.

7 VLIV INTENZITY ODVODU TEPELNÉ ENERGIE NA VYFUKOVANÉ PRODUKTY

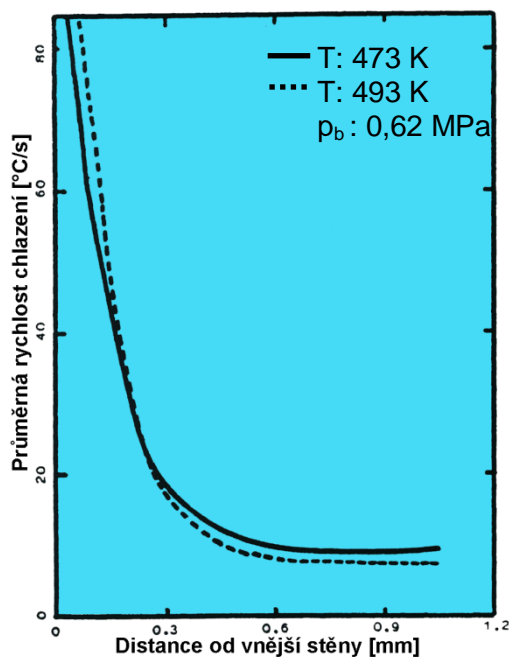
Kvalita produktů je dalším důležitým aspektem, který nesmí být opomenut. Ačkoliv se jedná o velmi významnou část problematiky produkce více či méně uzavřených polymerních produktů, neexistuje mnoho publikací zabývajících se tímto tématem. Mezi nejzajímavější publikace patří zejména práce profesora D. M. Kalyona a kolektivu [21], [22]; S.B. Tana a P.R. Hornsbyho [36]. Tito výzkumní pracovníci zaměřili svá úsilí na prozkoumání vlivu intenzity odvodu tepelné energie na utváření nadmolekulární struktury, deformaci a optické vlastnosti vyfukovaných produktů. Dosažené výsledky indikují, že existence výrazných diferencí v teplotní historii materiálu významně ovlivňuje vlastnosti produktů. Fragmenty materiálu, které se nacházejí blízko vnějšího povrchu, chladnou v důsledku intenzivního odvodu tepelné energie velmi rychle, zatímco fragmenty materiálu nacházející se poblíž vnitřního povrchu tuhnou podstatně déle. Tento zřejmý rozdíl může vést k výrazným rozdílům v kinetických podmínkách tuhnutí a značně tak ovlivňovat utvářenou strukturu. Dle uvedených autorů navíc rozdíly v délce trvání relaxace před okamžikem ztuhnutí stěny mezi oběma povrchy dále evokují distribuci orientace a tvorbu vnitřního pnutí.

7.1 Vliv intenzity odvodu tepelné energie na struktura polymerů

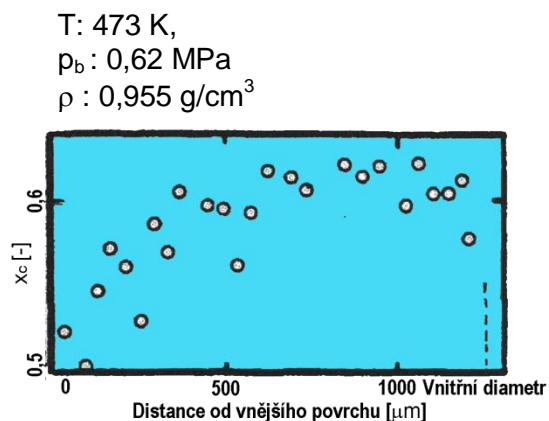
Nadmolekulární struktura semikrystalických polymerů se skládá z uspořádaných (krystalických) a neuspořádaných (amorfních) fragmentů. Jejich poměr je definován jako stupeň krystalinity. Procentuální zastoupení krystalické, respektive amorfni fáze závisí nejvíce na materiálové schopnosti k tvorbě uspořádané struktury [55]. Nicméně termokinetické podmínky tuhnutí mají na výsledný poměr také významný vliv. Například je-li aplikováno intenzivní chlazení, nemají krystalizační zárodky dostatek času k růstu, což evokuje vznik velkého množství malých sférolitů. Naopak aplikace méně intenzivního odvodu tepelné energie dává rostoucím sférolitům více času k růstu. Výsledkem je tvorba menšího počtu větších sférolitů [55].

Pro vyfukovací proces to znamená, že intenzivní chlazení na rozhraní polymer/ forma (součinitel přestupu tepla 500 W/m².K) bude evokovat tvorbu velkého počtu malých sférolitů. Naopak nízký přestup tepla na rozhraní polymer/ interní rozhraní (standardně vzduch o teplotě okolí, součinitel přestupu tepla 5 W/m².K) zapříčiní vznik menšího počtu, ale větších sférolitů. Tyto strukturní difference následně způsobí i rozdílné rozložení stupně krystalinity v tloušťce stěny produktu, kdy stupeň krystalinity se bude zvyšovat od minimální hodnoty dosažené

na vnějším povrchu až k hodnotě maximální dosažené poblíž vnitřního povrchu. S rostoucí tloušťkou produktu a intenzitou chlazení vyfukovací formy budou dosažené rozdíly ještě markantnější. Profesor Dilhan Kalyon provedl analýzu představeného teoretického předpokladu ve své práci [21], jejíž výsledky, které zcela korespondují s výše uvedenými hypotézami, jsou zobrazeny na obrázcích 143 a 144. Maximální stupeň krsystalinity byl dosažen v oblasti s nízkou intenzitou přestupu tepla a minimální v oblasti s intenzitou nejvyšší.

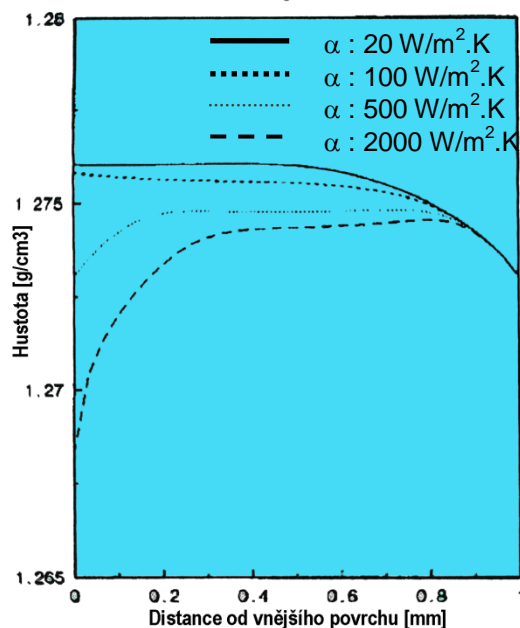


Obr. 143 Průměrná rychlost chlazení v tloušťce stěny produktu



Obr. 144 Distribuce krystalinity v tloušťce stěny produktu

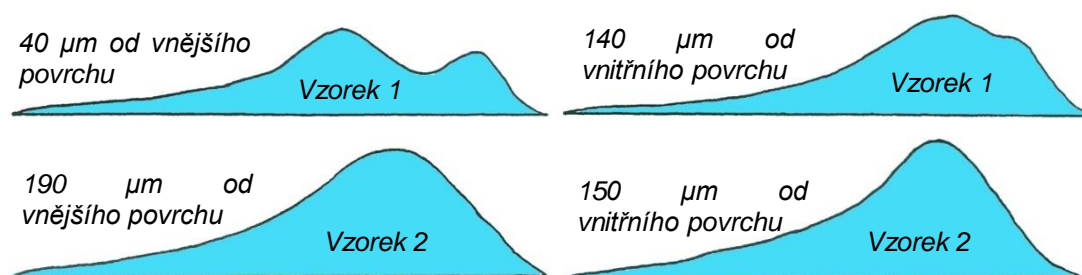
Nejjednodušší metodou, jak získat informace o změně krystalinity, je hodnocení hustoty. Krystalické fragmenty totiž obsahují makromolekuly, jejichž geometrická distribuce vytváří užší vzájemné uspořádání makromolekul, než je tomu v případě amorfních náhodně uspořádaných lokací. Výsledkem je vyšší hustota těchto fragmentů [55]. Nárůst hustoty pak jasně indikuje změnu krystalické struktury. Profesor D. M. Kalyon ve svých dalších experimentálních měřeních [22] potvrdil



Obr. 145 Efekt chladících podmínek na distribuci hustoty

výše uvedené teoretické předpoklady o vlivu nerovnoměrných podmínek chlazení na rozhraní forma/ polymer/ interní rozhraní a zaznamenal evidentní difference v rozložení hustoty v rámci tloušťky stěny produktu, viz obrázek 145. Maximální hodnoty hustoty byly evidovány na vnitřním rozhraní polymer/ interní chlazení (stacionární vzduch). Se zvyšující se intenzitou odvodu tepelné energie hodnoty hustoty klesaly až k minimu dosaženém na vnějším rozhraní (vyfukovací forma/ polymer).

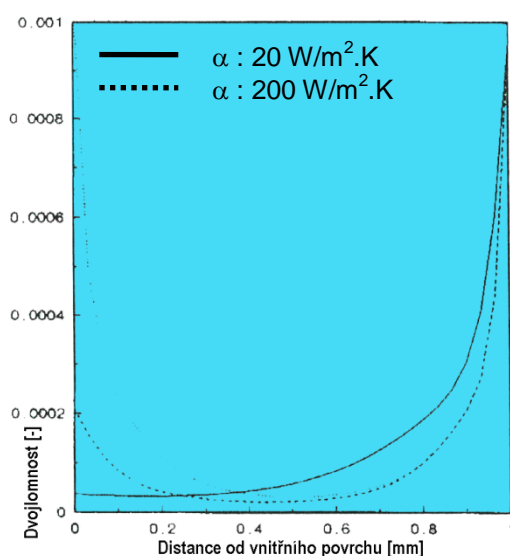
Další možností, jak efektivně dokázat vliv rozdílné intenzity odvodu tepelné energie na utvářenou strukturu, je DSC analýza („Diferenciální skenovací kalorimetrie“), kde stupeň krystalinity je roven poměru entalpie tání testovaného polymeru s teoretickou entalpií tání polymeru plně krystalického. Hodnota entalpie tání je úměrná ploše pod endotermní křivkou teploty tání. Příklad posouzení vlivu rozdílné intenzity chlazení (forma/ polymer/ interní prostředí) na utvářenou nadmolekulární strukturu (morfologii) pomocí DSC analýzy je představen opět v práci D.M. Kalyona [22]. Profesor Kalyon použil pro svá experimentální měření 200 ml testovaný produkt, vyráběný jednak z PE o hustotě 0,960 g/cm³ (vzorek 1) při stupni krystalinity 14, jednak z PE o hustotě 0,953 g/cm³ a stupni krystalinity 16 (vzorek 2). Z testovaných produktů byly odebírány napříč tloušťkou stěny vzorky, které byly dále podrobeny termické analýze. Z prezentovaných dosažených výsledků, zobrazených na obrázku 146 (ploch odpovídajícím entalpií tání), lze potvrdit výše uvedené teoretické předpoklady o dosažení vyššího stupně krystalinity v oblastech poblíž vnitřního povrchu produktu. Ze zaznamenaných endotermních průběhů je také evidentní tvorba dvojitého píku, který vznikl v oblasti intenzivního odvodu tepelné energie vzorku 1. Příčiny vzniku tohoto efektu je nutno hledat v podmínkách krystalizace a především orientace. Rychlý odvod tepelné energie zde pravděpodobně zapříčinil tvorbu tzv. zamrzlé vrstvy na rozhraní polymer/ vyfukovací forma a způsobil vznik výrazné orientace molekul evokované deformační historií. Nízký součinitel přestupu tepla na rozhraní polymer/ interní prostředí umožnil následnou relaxaci, a tedy i nižších úrovní orientace [22].



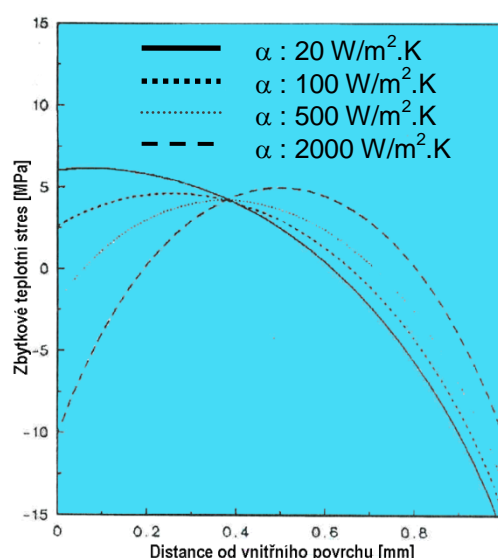
Obr. 146 Vliv intenzity odvodu tepelné energie na průběhy endotermních křivek [22]

7.2 Vliv intenzity odvodu tepelné energie na optické vlastnosti

Orientace makromolekul má také významný vliv na optické vlastnosti. Profesor D. M. Kalyon dokázal v jeho studiích [21], [22], že distribuce dvojlomnosti je funkcí distance od vnějšího povrchu (obrázek 147). Intenzivní rychlosti chlazení na rozhraní polymer/ forma způsobují v povrchové vrstvě utváření orientace makromolekul, které generují vysoké hodnoty dvojlomu (zvláště při nízkých iniciačních teplotách parizonu). Naopak nízký součinitel přestupu tepla na rozhraní interní prostředí/ polymer způsobuje pokles orientace makromolekul. Dvojlomnost tedy klesá z maxima, dosaženého na vnějším povrchu stěny výrobku, k minimu vnitřního povrchu.



Obr. 147 Efekt chladících podmínek na distribuci dvojlomnosti



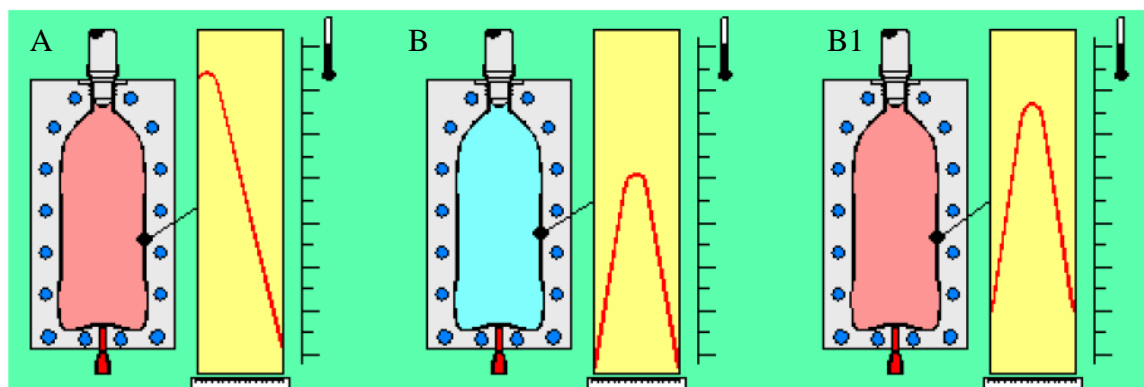
Obr. 148 Efekt chladících podmínek na distribuci zbytkového teplotního napětí

7.3 Vliv intenzity odvodu tepelné energie na deformaci produktů

Deformace produktu jsou přímo závislé na zbytkovém napětí tvořeném lokálními variacemi napěťových polí během fáze tuhnutí. Lokální variace napěťových polí, a tedy i výsledné napěťové pole jsou z velké části předurčeny homogenitou teplotního pole, jelikož rozdíly teplot způsobují tvorbu nerovnoměrné struktury, vznik tahových gradientů a ohybového momentu. Tyto složky následně ve snaze dosažení rovnovážného stavu (vyrovnání napětí) mohou evokovat lokální deformace [4]. V otázce chlazení vyfukovacího procesu lze předpokládat, že zvýšení rychlosti chlazení externího chladicího systému (vyfukovací formy) vede vlivem zvýšení rozdílu teplotních gradientů k zvýšení ohybových momentů a zvýšení nebezpečí deformace produktů. Naopak zvýšení chladících schopností interního temperačního systému způsobí snížení hodnot zbytkového pnutí (viz obr. 148) v důsledku dosažení homogennějšího teplotního odvodu z obou stran produktu.

8. EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ VLIVU INTERNÍHO CHLAZENÍ NA VLASTNOSTI VYFUKOVANÝCH PRODUKTŮ

Představené teoretické rozborů i dosažené výsledky výzkumných týmů jasně deklarují, že intenzita chlazení vyfukovacího procesu může významně ovlivnit vlastnosti produktů. Velké rozdíly v odvodu tepelné energie na rozhraní stěna formy/ polymer/ interní prostředí mohou způsobit tvorbu nežádoucích jevů jako vznik nerovnoměrné struktury, vnitřního prnutí či dokonce deformací produktů [4], [21], [22]. Je tedy nanejvýše důležité dosažení co možná nejvíce rovnoměrného teplotního odvodu obou temperačních okruhů. Proto by mohla aplikace interních temperačních systémů zajistit díky zrovnoměrnění termokinetických podmínek obou stran chladnoucího polymerního produktu (obrázek 149) pozitivní ovlivnění kvality produktů. Z těchto důvodů bylo dalším dílčím úkolem práce experimentální stanovení vlivu interního chlazení na vlastnosti vyfukovaných produktů.



Obr. 149 Distribuce teploty ve stěně produktu při rozdílných variantách chlazení

(A) klasický způsob interního chlazení (vzduch); (B) aplikace progresivního interního chlazení; (B1) navýšení produktivity výroby díky progresivnímu intern. chlazení [8]

Za účelem detekce vlivu intenzity odvodu tepelné energie na kvalitu, respektive vybrané vlastnosti produktů, byl vzhledem k vysokému chladicímu potenciálu, a tedy předpokladu dosažení co nejmarkantnějších výsledků, aplikován CO₂ temperační systém. S odkazem na výše uvedené teoretické předpoklady byly pozorovanými vlastnostmi produktů struktura, mechanické vlastnosti, optické vlastnosti a tvarová stabilita. Stejně jako při posouzení aplikovatelnosti CO₂ temperačního systému byla velice důležitým krokem volba testovaných produktů a jejich materiálu. Vzhledem ke geometrii (problematika místa odebrání zkušebních vzorků) a dosahovaným chladicími charakteristikám (vysoká intenzita interního chlazení) byl vliv chladicího efektu CO₂ ověřován na 0,3 litrové lahvičce. V otázce volby testovaných materiálu byly opět vybráni zástupci nejpoužívanějších materiálů – polyolefiny, a to lineární, vysoce hustotní, semikrytalický polyetylen Liten BB 29 a homopolymer polypropylen Mosten EH 01. Rovněž v tomto případě byl pro

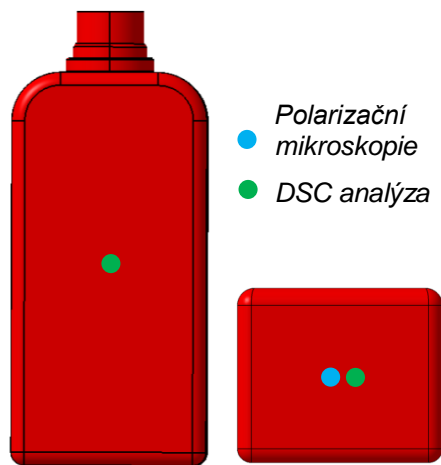
experimentální produkci využít extruzní vyfukovací stroj firmy GDK s.r.o. (GM 251) a implementovaná temperační jednotka společnosti Linde a.s. . Pro posouzení vlivu CO₂ interního chlazení byla aplikována tři rozličná technologická nastavení výrobního procesu, představená v tabulce 33. První nastavení odpovídá výrobnímu optimu, tedy maximální možné rychlosti výroby (bez interního chlazení), při které nevzniká produkce „zmetků“. Za tímto účelem byla nastavena teplota cirkulujícího média na nejmenější možný parametr (maximální efektivita temperačního systému formy - vysoká intenzita odvodu tepelné energie na rozhraní forma/ polymer). Při druhém technologickém nastavení procesu byl zintenzivněn přestup tepla na rozhraní polymer/ interní prostředí injektáží kapalného oxidu uhličitého v délce korespondující 60 % celkové doby chlazení výrobního optima. V posledním kroku byla pomocí interního chlazení navýšena produktivita výroby.

Tab. 33 Experimentální nastavení produkce detekující vliv interního chlazení na kvalitu produktů

	Produkt	0,3l „lahvička“
1	Teplota parizonu	190°C
	Teplota cirkulujícího média	6°C
	Čas cyklu výrobního optima	22s
2	Čas interního chlazení/ množství použitého CO ₂	8s (17,6g)
3	Navýšení produktivity	43%

8.1 Stanovení vlivu interního chlazení na strukturu polymerů

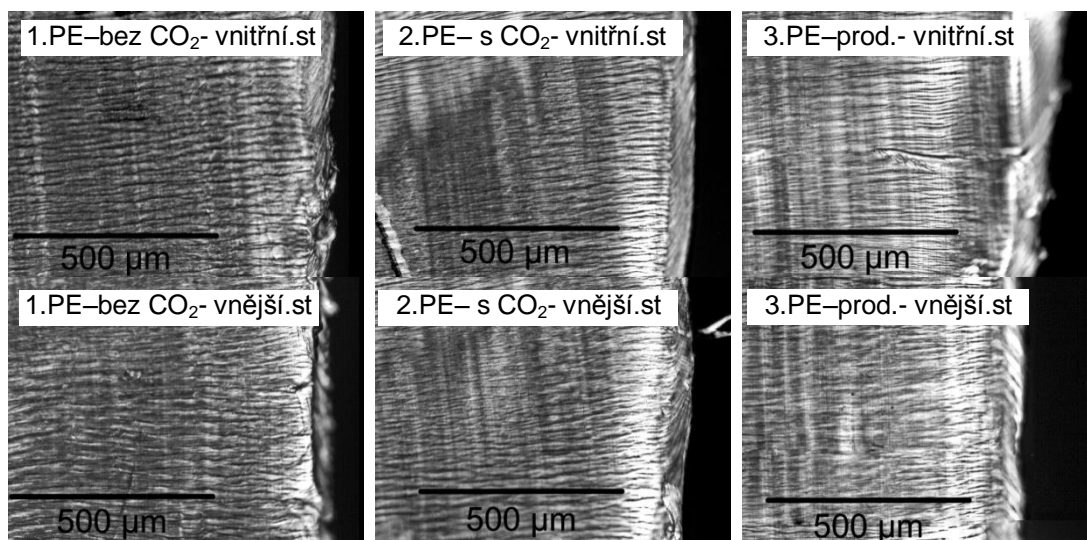
Z teoretického rozboru, představeného v kapitole 7.1, lze pro námi testované produkční varianty předpokládat dosažení výrazných diferencí struktury v oblastech s rozdílnou rychlostí tuhnutí, tzn. napříč tloušťkou stěny produktu i v oblastech výskytu teplotních extrémů. Ověření tohoto předpokladu bylo realizováno pomocí polarizační mikroskopie a DSC analýzy. Na obrázku 150 jsou představena místa odběru zkušebních vzorků. Pro polarizační mikroskopii se jedná o dno produktu, kde dle detekovaných chladících charakteristik injektované CO₂ dosahuje nejvyšších efektivit a kde dochází vlivem protahování parizonu k zesílení tloušťky stěny. Proto by se právě zde mohla diskutovaná problematika rozdílné intenzity přestupu tepla obou rozhraní projevit nejvíce. V případě DSC analýzy byly dále kromě dna produktu za účelem detekce vlivu homogenity teplotního pole odebírány zkušební vzorky i ve střední oblasti lahvičky - těle lahvičky.



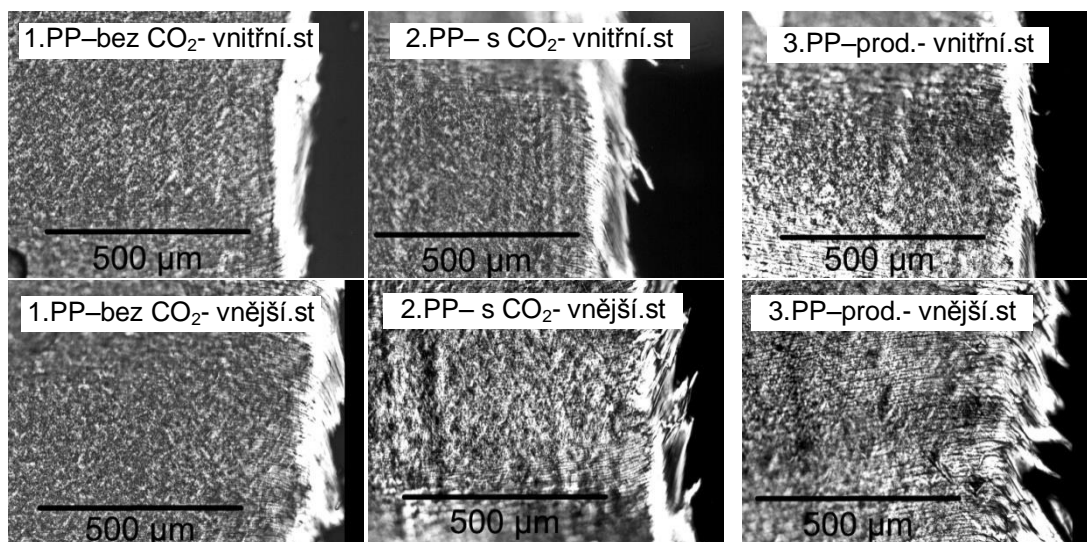
Obr. 150 Místa odběru zkušebních vzorků

8.1.1 Polarizační mikroskopie

Polarizační mikroskopie je optická metoda, která nám pomocí polarizovaného světla umožňuje kvantifikované pozorování vlivu rozdílných termokinetických podmínek obou rozhraní (vnějšího i vnitřního) produktu na utvářenou krystalickou strukturu polymerů - velikost, tvar a distribuci sferolitů. Postup měření spočíval v odebrání zkušebních vzorků, vytvoření tenkých 20 µm vrstev (pomocí mikrotomu), ustavení, zaostření a snímání strukturních obrázků při desetinásobném zvětšení. Z porovnání pořízených strukturních snímků, které jsou zobrazeny na obrázcích 151 a 152, není možné potvrdit teoretické předpoklady o vlivu rozdílné rychlosti odvodu tepelné energie vyfukovací formy a interního prostředí na utvářenou strukturu. Struktura obou z pozorovaných materiálů se jeví jako zcela homogenní, tj. od vrstvy způsobené deformací mikrotomového nože nejsou evidentní žádné rozdíly ve velikosti, tvaru či distribuci sferolitů.



Obr. 151 Strukturní snímky materiálu PE



Obr. 152 Strukturní snímky materiálu PP

8.1.2 DSC analýza

„Diferenciální skenovací analýza“ je velice efektivním nástrojem pro posouzení vlivu procesních parametrů na utvářenou nadmolekulární strukturu polymerních materiálů. Pro eliminaci chyb přístroje byla před realizovaným experimentálním měřením na zařízení METTLER Toledo DSC 1 Star provedena kalibrace přístroje. Další postup měření probíhal následovně: odebrání zkušebních vzorků, hermetického uzavření vzorků v hliníkové kapsli o průměru 5 mm, vkládání vzorků do jedné z cel DSC hlavy, iniciace inertní plyné atmosféry (dusíkem), nastavení procesních parametrů (teplotní rozsah měření, hmotnost vzorku, rychlost ohřevu a ochlazování). Po zadání vstupních parametrů bylo spuštěno měření, tj. cely byly zahřívány vzájemně nezávislými topnými elementy tak, aby jejich teplota stoupala zvolenou konstantní rychlostí (10°C/min) a zaznamenával se rozdíl tepelných příkonů mezi celami. Jak již bylo avizováno, výsledky DSC analýzy jsou rozděleny do dvou částí. V první části je analyzován vliv intenzity odvodu tepelné energie napříč tloušťkou stěny produktů ve střední části stěny produktu a v místě výskytu teplotního extrému – dnu. V druhé části pak vliv chladících efektivit externího a interního temperačního systému na utvářenou strukturu v tloušťce produktu.

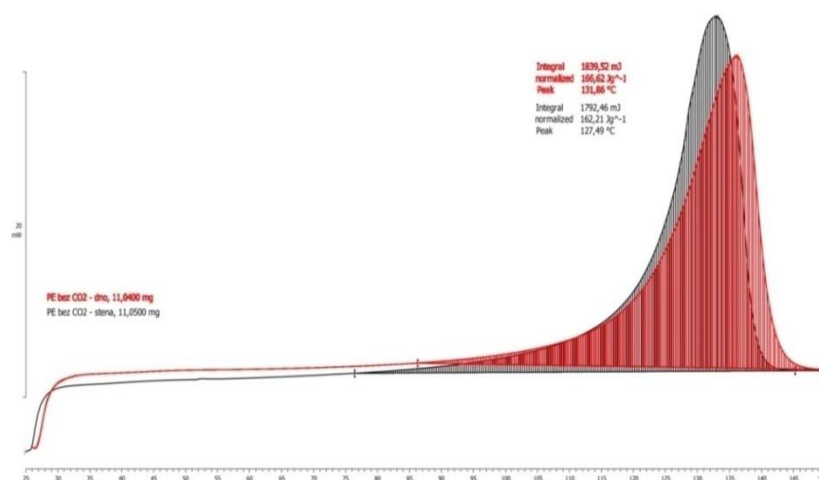
Ze zobrazených výsledků termické analýzy, obrázky 153 až 155, tabulka 33 a příloha 9 práce, jednotlivých procesních nastavení (1- výrobní optimum, 2- injektaž CO₂, 3– 43 % navýšení produktivity CO₂ injektaží) je možné konstatovat, že u materiálu PE Liten BB 29 jsou evidovány rozdíly v naměřených entalpiích tání, které dokazují vliv procesních parametrů na utvářenou strukturu. Nejvyšší hodnoty entalpie tání, respektive stupně krystalinity byly evidovány v oblasti dna produktu při procesním nastavení odpovídajícím výrobnímu optimu, tedy bez CO₂ injektaže. Toto místo teplotního extrému, vlivem silnější tloušťky stěny produktu a nižší efektivy chlazení, způsobilo výhodnější termokinetické podmínky pro tvorbu a růst sférolitů. Naopak nejnižší hodnoty entalpie tání byly detekovány díky výraznému navýšení efektivy chlazení, při aplikaci CO₂ injektaže. Při navýšení produktivity výroby byl evidován opětovný nárůst entalpie tání, jejíž úroveň téměř odpovídala úrovni entalpie tání výrobní varianty (1) - procesního optima. Uvedená tvrzení jsou díky vysoké efektivě externího temperačního systému, nižší tloušťce produktu v oblasti stěny obzvláště zřejmé u vzorků odebraných ve dnu. Přestože porovnání výsledků entalpie tání v oblasti dna a stěny produktu naznačuje jisté difference, není možné vzhledem k malým rozdílům jednoznačně potvrdit předpokládanou skutečnost o dosažení vyššího stupně krystalinity v oblasti teplotního extrému – dnu produktu. Výsledky termické analýzy materiálu PP mosten EH 01 nepotvrzují výše uvedené závěry. Hodnoty entalpie tání lze považovat za srovnatelné. Možnou příčinou této

skutečnosti je rychlost růstů sferolitů, která je u PP obecně až tisícinásobně menší než u PE [55]. Vlivem nižší rychlosti růstu krystalografických útvarů se vliv změny intenzity odvodu tepelné energie neprojevil na změně krystalinity tohoto materiálu.

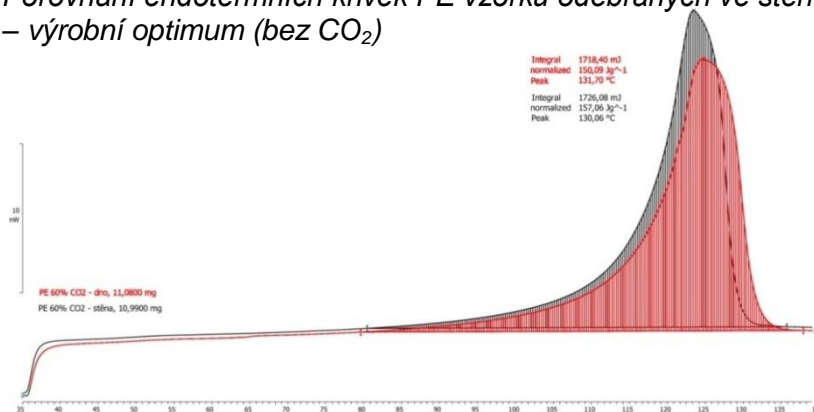
Tab. 34 Vyhodnocené parametry entalpie tání v oblasti dna a stěny produktu

Materiál	Místo odběru	Výrobní optimum	Navýšení efektivity s CO ₂	Navýšení produktivity
PE	Dno	166,62 J.g ⁻¹	150,09 J.g ⁻¹	159,29 J.g ⁻¹
	Stěna	162,22 J.g ⁻¹	157,06 J.g ⁻¹	157,75 J.g ⁻¹
PP	Dno	93,87 J.g ⁻¹	94,93 J.g ⁻¹	88,58 J.g ⁻¹
	Stěna	94,53 J.g ⁻¹	94,17 J.g ⁻¹	92,57 J.g ⁻¹

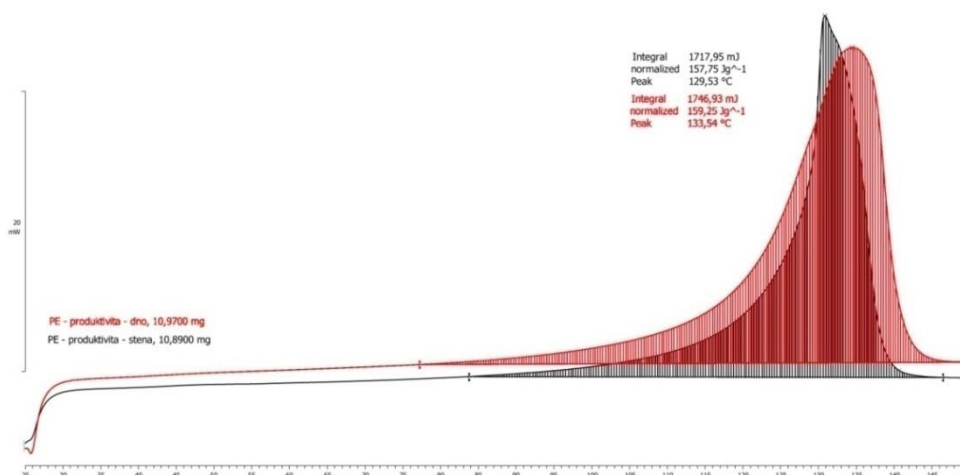
Z průběhů endotermních křivek je kromě hodnot entalpie, teploty tání a tuhnutí možné zjistit také informace o deformační historii, jako orientaci makromolekul, velikost krystalizačního zbytkového napětí, kde materiál s užší distribucí a vyšším píkem vykazuje vyšší hodnoty těchto parametrů [22]. Ze zobrazených endotermních průběhů jsou již na první pohled zřejmé rozdíly v průbězích křivek. Vzorky odebrané ve stěně produktu vykazují vyšší pík a užší distribuci. Z čehož lze vyvodit závěr, že intenzivnější odvod tepelné energie v oblasti stěny produktu způsobuje vyšší úroveň orientace makromolekul a hodnoty zbytkového napětí než v oblastech dna produktů, tedy oblasti pomaleji chladnoucí.



Obr. 153 Porovnání endotermních křivek PE vzorků odebraných ve stěně a dnu produktu – výrobní optimum (bez CO₂)



Obr. 154 Porovnání endotermních křivek PE vzorků odebraných ve stěně a dnu produktu – interní chlazení injektáží CO₂



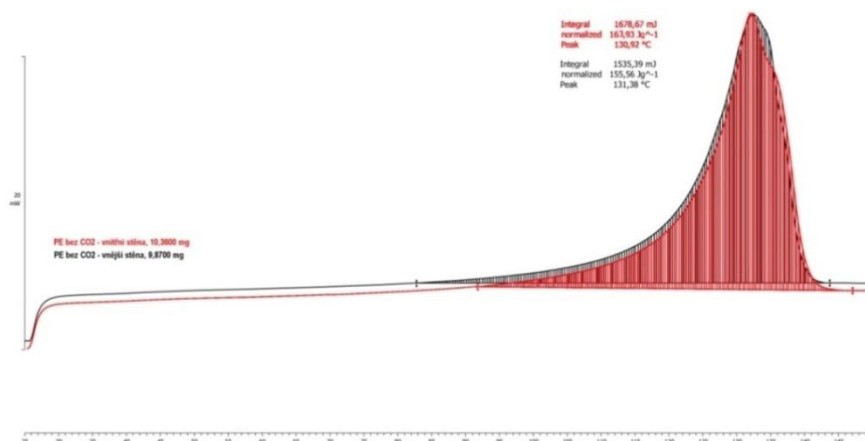
Obr. 155 Porovnání endotermních křivek PE vzorků odebraných ve stěně a dnu produktu – navýšení produktivity injektáží CO₂

V dalším kroku byla provedena analýza vlivu rozdílné intenzity odvodu tepelné energie na rozhraní vyfukovací forma/ stěna produktu a rozhraní stěna produktu/ interní prostředí na utvářenou strukturu v tloušťce stěny produktů. Pro posouzení diferencí struktury byly z oblastí dna produktů (obr. 150) pomocí mikrotomového nože odebrány ve vzdálenosti 100 μm od vnějšího a vnitřního povrchu zkušební vzorky (tloušťky 60 μm), které byly následně opět podrobeny termické analýze. Zaznamenané endotermní křivky společně s vyhodnocenými parametry entalpie tání jsou prezentované na obr. 156 až 158, v tabulce 35 a příloze 10 práce. Dosažené výsledky PE vzorků potvrzují vyřčené teoretické predikce o vlivu intenzity odvodu tepelné energie na utvářenou strukturu. Vlivem vysoké intenzity odvodu tepelné energie na rozhraní vyfukovací forma/ polymer při procesním nastavení (1) odpovídající výrobnímu optimu byly evidovány nižší hodnoty entalpie tání u vnějšího povrchu produktů. Aplikace CO₂ injektáže způsobila výrazný nárůst efektivity interního chlazení, jejímž důsledkem byl významný pokles entalpie tání v oblastech vnitřního povrchu produktu. Hodnoty entalpie tání zkušebních vzorků při navýšení produktivity výroby v důsledku zrovnoměnění termokinetických podmínek chladnutí obou rozhraní dosahovaly stejných parametrů. Stejně jako v předcházejícím případě nižší rychlost růstu krystalografických útvarů PP materiálů zapříčinila, že se výše pozorované závislosti u materiálu Mosten EH 01 neprojeví.

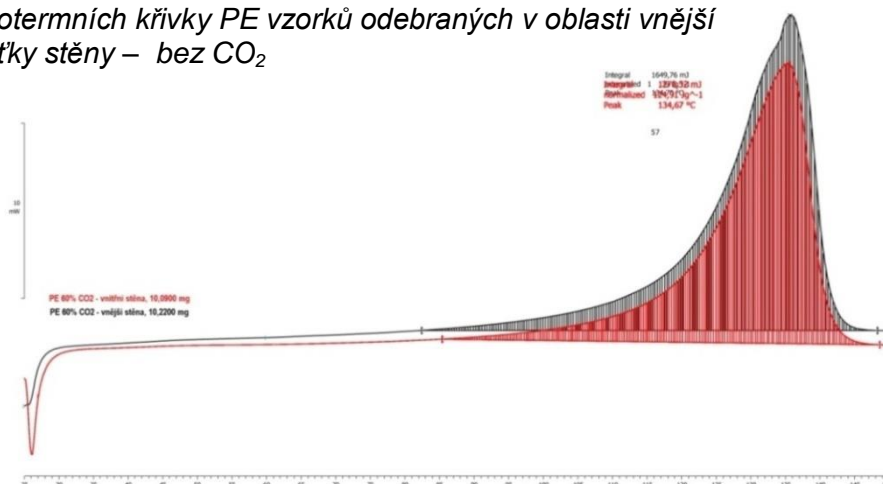
Tab. 35 Vyhodnocené parametry entalpie tání v tloušťce stěny produktu

Materiál	Místo odběru	Výrobní optimum	Navýšení efektivity s CO ₂	Navýšení produktivity
PE	Vnější stěna	155,56 J.g ⁻¹	157,39 J.g ⁻¹	155,71 J.g ⁻¹
	Vnitřní stěna	163,93 J.g ⁻¹	124,91 J.g ⁻¹	156,72 J.g ⁻¹
PP	Vnější stěna	85,15 J.g ⁻¹	85,27 J.g ⁻¹	89,23 J.g ⁻¹
	Vnitřní stěna	87,68 J.g ⁻¹	86,68 J.g ⁻¹	87,12 J.g ⁻¹

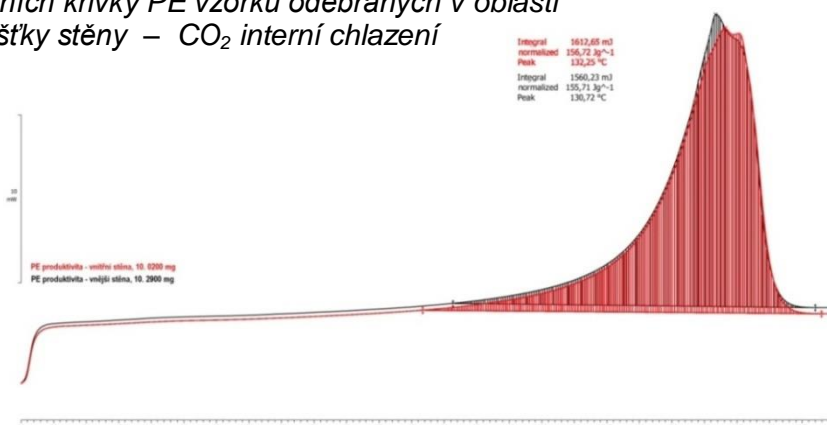
Z průběhů endotermních křivek je vzhledem k výše uvedenému rozboru dále patrné, že při technologickém nastavení odpovídající výrobnímu optimu aplikace intenzivního interního chlazení způsobila v oblastech vnitřní stěny produktu kromě poklesu entalpie tání nárůst orientace makromolekul a velikosti krystalizačního napětí. Endotermní křivky obou testovaných lokací (vnější, vnitřní povrch) při ostatních technologických nastaveních (1 - výrobní optima bez CO₂ interního chlazení, 3 - navýšení produktivity výroby) vykazovaly obdobné průběhy, a proto lze předpokládat dosažení stejných úrovní těchto parametrů.



Obr. 156 Endotermních křivky PE vzorků odebraných v oblasti vnější a vnitřní tloušťky stěny – bez CO₂



Obr. 157 Endotermních křivky PE vzorků odebraných v oblasti vnější a vnitřní tloušťky stěny – CO₂ interní chlazení



Obr. 158 Endotermních křivky PE vzorků odebraných v oblasti vnější a vnitřní tloušťky stěny – navýšení produktivity

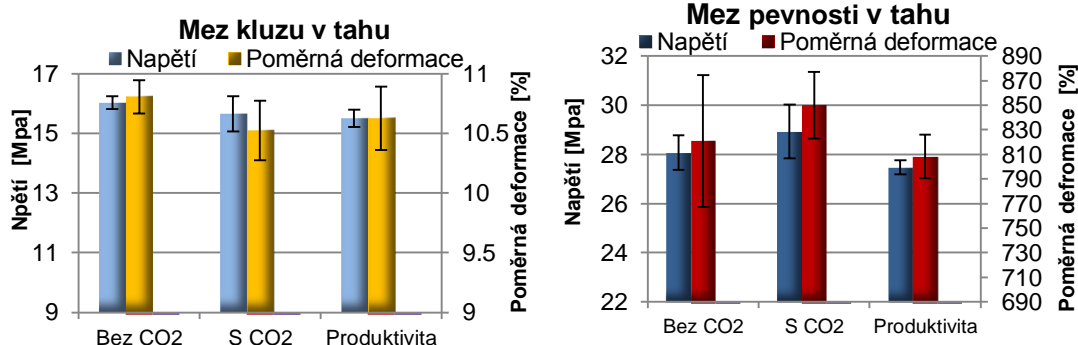
8.2 Stanovení vlivu interního chlazení na mechanické vlastnosti

Hodnocení mechanických vlastností bylo posuzováno pomocí tahové zkoušky realizované na trhacím zařízení Housnfield H 10 KT. Místo odebrání normalizovaných zkušebních vzorků typu 1BA bylo voleno vzhledem ke geometrii produktu v jeho středové rovinné oblasti, viz obrázek 159. Z výsledků tahových zkoušek pro hodnocené materiály byly následně v souladu s normou ČSN EN ISO 527 stanoveny jejich pevnostní (mez kluzu, mez pevnosti v tahu) i deformační charakteristiky (modul pružnosti v tahu).

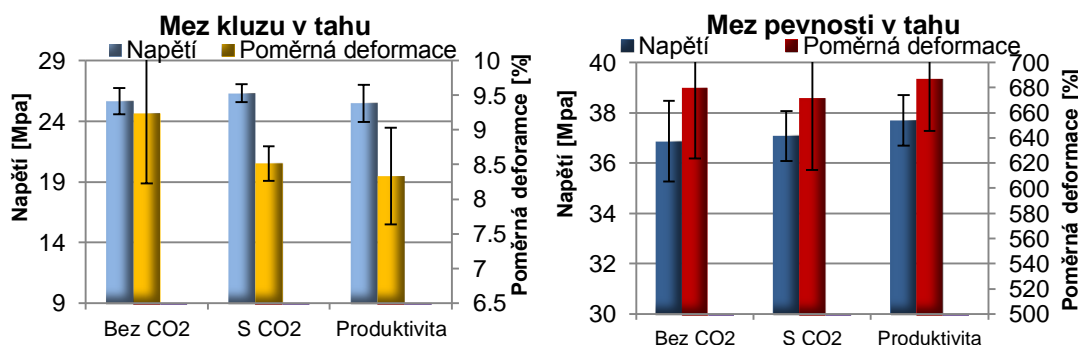


Obr. 159 Místo odebrání zk. tělesa

Pro hodnocení mechanických vlastností semikrystalických polymerů je nezbytné vědět, že krystalické fragmenty mají odlišné mechanické vlastnosti od fragmentů amorfních. Jejich užší uspořádání způsobuje vznik vyšších adhezních sil. To znamená, že zvyšující se stupeň krystalinity evokuje nárůst pevnosti, tuhosti, a tvrdosti při současném snížení houževnatosti [55]. Rozdíly v intenzitě odvodu tepelné energie by tak mohly zapříčinit i difference v mechanických vlastnostech. Výsledky tahové zkoušky nepotvrdily tyto premisy, viz obr. 160 a 161, jelikož vyhodnocené rozdíly mezi jednotlivými měřeními byly velmi malé a mohou být vzhledem k dosaženým směrodatným odchylkám zanedbány.



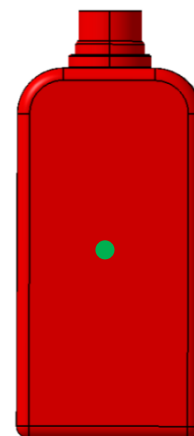
Obr. 160 Vyhodnocené mechanické vlastnosti materiálu PE Liten BB 29



Obr. 161 Vyhodnocené mechanické vlastnosti materiálu PP Mosten EH 01

8.3 Stanovení vlivu interního chlazení na optické vlastnosti

Pro posouzení vlivu intenzity interního chlazení na optické vlastnosti polymerních materiálů bylo použito optického mikroskopu NICON ECLIPSE ME 600. Hodnocenými parametry zkušebních vzorků, které byly odebrány ve středové lokaci stěny produktů (obrázek 162), byly index lomu a za účelem detekce míry orientace makromolekul také dichroický poměr. Výsledky, prezentované v tab. 36, nevykazují žádné difference mezi parametry indexu lomu. Proto lze deklarovat, že nedochází ke změně lomu procházejícího světla, a tedy optických vlastností produktů vyráběných při aplikaci CO₂ interního chlazení. Mezi parametry dichroického poměru však



Obr. 162 Místo odebrání zk. tělesa

lze pozorovat zjevné rozdíly. Tyto rozdíly korespondují s výsledky a predikcemi DSC analýzy, kde bylo zjištěno, že výrazné navýšení efektivity interního chlazení může způsobit nárůst orientace makromolekul. Z prezentovaných výsledků je evidentní, že nejvyšší stupeň orientace makromolekul (0 - maximální orientace; 1 - minimální orientace) byl evidován právě u výrobní varianty navyšující efektivitu interního chlazení CO₂ injektáží. Dále bylo zjištěno, že při následném navýšení produktivity výroby docházelo v důsledku růstu teploty odformovaných produktů k opětovnému snížení orientace makromolekul. Z vyhodnocených dat je také patrné, že výrazně vyšší úrovně orientace dosahovaly produkty vyráběné z PP materiálu.

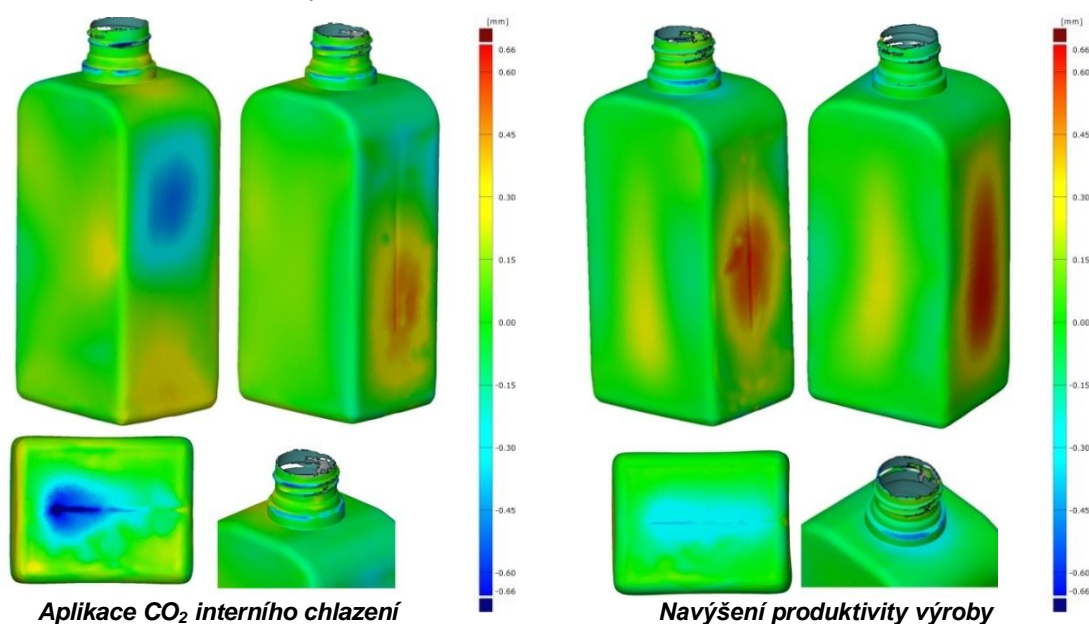
Tab. 36 Vyhodnocené parametry optických vlastností

Materiál	Výrobní optimum	Aplikace CO ₂ chlazení	Navýšení produktivity
Index lomu			
PE	1,53	1,52	1,53
PP	1,49	1,49	1,48
Dichroický poměr			
PE	0,817	0,752	0,810
PP	0,305	0,229	0,318

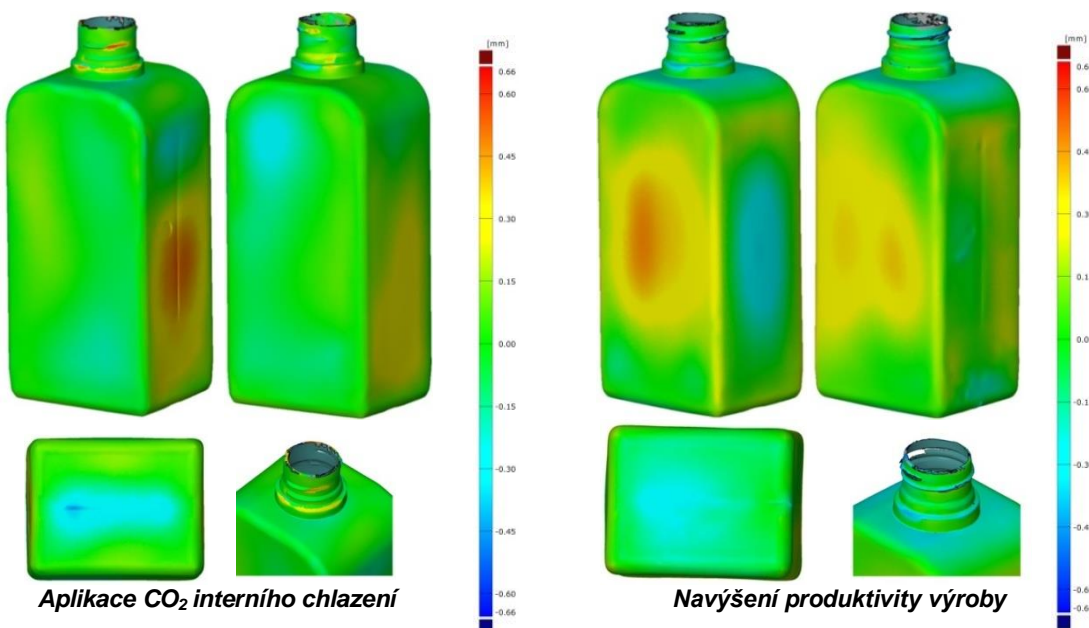
8.4 Stanovení vlivu interního chlazení na tvarovou stabilitu produktů

K posouzení vlivu intenzity odvodu tepelné energie na tvarovou stabilitu vyfukovaných produktů bylo využito 3D optického skeneru ATOS II 400. Postup měření spočíval v nanesení tenké antireflexní vrstvy (MR 2000 Anti-Reflex L), přiřazení referenčních bodů, ustavení a snímání vzorků. Následovalo vzájemné porovnání získaných modelů (software GOM Inspect V8). Jako referenční vzorek byl definován tvar produktu vyrobený při technologickém nastavení výrobního optima. Zobrazené výsledky, obrázky 163 a 164, tedy znázorňují rozměrové odchylky od tohoto tvaru. Z vyhodnocených výsledků jsou zřejmé jisté difference, a to jak při

navýšení efektivity interního chlazení CO₂ injektáží, tak při následném navýšení produktivity výroby. Nejvyšší difference jsou evidovány v oblastech rovinných stěn produktů (dno, boční stěny). Jedná se však o rozdíly nepřevyšující hodnotu 0,6 mm, což je vzhledem k požadavkům na přesnost technologie extruzního vyfukování velmi malá hodnota. S přihlédnutím k této skutečnosti a ke skutečnosti, že v dříve evidovaných problematických oblastech tvarové stability (oblast hrdla), lze považovat vyhodnocené difference za zanedbatelné je možné tvrdit, že realizovaná technologická nastavení využívající CO₂ interního chlazení nezpůsobila negativní ovlivnění tvarové stability.



Obr. 163 Porovnání tvarových diferencí PE produktů produkovaných při aplikaci CO₂ interního chlazení a navýšení produktivity výroby



Obr. 164 Porovnání tvarových diferencí PP produktů produkovaných při aplikaci CO₂ interního chlazení a navýšení produktivity výroby

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Výzkumná část disertační práce je zaměřena na několik oblastí. Nejprve je posuzována aplikovatelnost současných temperačních systémů umožňujících injektáž zkapalněného oxidu uhličitého pro extruzně vyfukovací proces. Ve vyfukovacím procesu byl zkoumán optimální způsob nastavení procesu chlazení, zjišťovány chladicí charakteristiky použitého média, efektivita chlazení u tvarově i objemově rozdílných dílů a proveden ekonomický rozbor problematiky. Další oblastí experimentální činnosti byla detekce vlivu progresivního interního chlazení na vyfukované produkty a konstrukce inovovaného způsobu interního chlazení zkapalněnými plyny.

9.1 Diskuze vlivu procesních parametrů CO₂ interního chlazení na efektivitu chlazení u extruzně vyfukovacího procesu

Z experimentálně stanovených výsledků detekce vlivu procesních parametrů CO₂ interního chlazení na efektivitu chlazení extruzně vyfukovacího procesu (kapitola 5.3) je možné vyvodit závěry, že z hlediska procesu nastavení injektáže expandujícího chladícího média v dutině vyfukovaného produktu je pro interní chladicí proces nejvýhodnější aplikace nepřerušené dávky na konci vyfukovacího procesu (fáze odvětrání). Přerušování dodávky CO₂ totiž způsobuje pokles obou procesních parametrů interního chladícího média - teploty i tlaku, což zapříčiňuje pokles chladícího efektu interního i externího temperačního systému. S rostoucí délkou prodlev mezi injektážními body a množstvím použitého média se uvedené tvrzení stává více patrné.

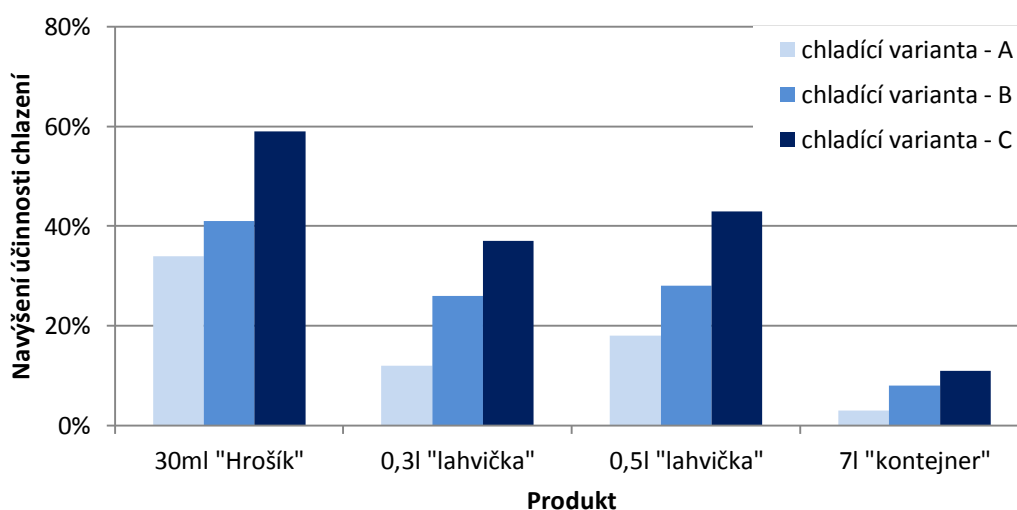
9.2 Diskuze chladícího efektu injektovaného CO₂

Z dosažených výsledků detekce chladících charakteristik injektovaného CO₂ použitého za účelem interního chlazení vyfukovacího procesu (kapitola 5.4.1) vyplývá, že chladící médium ve vnitřních kavitách produktů vytváří (kuželovitý) proud směřující od vstupní části (kapilára – ústí trnu) středem produktu do spodní části, kde dochází k jeho usměrnění (odrazem od dna produktu), jež způsobuje následnou cirkulaci média podél stěn produktu až do místa jeho odvodu, které je realizováno prostřednictvím kalibračního trnu a otevřeného odvětrávacího ventilu. Injektované kapalně CO₂ tedy po expanzi vytváří proudění unášející atomizované krystalky oxidu uhličitého, které primárně dopadají do spodních partií produktů, kde předávají největší část své tepelné energie. Proto byl právě v těchto lokacích evidován nejvyšší chladicí účinek. V zaznamenaných interních teplotních průbězích injektovaného CO₂ i simulačních analýzách tvarově i objemově rozdílných produktů

(30 ml „Hrošík“, 0,3 l a 0,5 l „lahév“, 7 l „kontejner“) byly evidovány jisté difference. Nejnižší interní teplotní průběhy (minimální teploty chladicího média) a zároveň nejrychlejší ustavení těchto průběhů dosahoval produkt nejmenšího objemu („Hrošík“). S rostoucím objemem produktů klesaly hodnoty dosažených teplotních minim a rostl čas jejich dosažení, viz obr. 106.

9.3 Diskuze vlivu rozměrovosti produktu na efektivitu CO₂ interního chlazení u extruzně vyfukovacího procesu

Výsledky experimentálního posouzení vlivu rozměrovosti produktu na dosahovanou efektivitu CO₂ interního chlazení (kapitola 5.4.1 a 5.4.2) zcela korespondují s výše uvedenými závěry detekce chladících charakteristik. Efektivita aplikovaného CO₂ interního chlazení klesala s rostoucím objemem produktů, viz obrázek 165. Nejnižšího nárůstu chladicího efektu extruzně vyfukovacího procesu (hodnoceno z maximální teploty odformovaných dílů) bylo dosaženo u nejobjemnějšího z testovaných produktů, 7 litrového „kontejneru“. Naopak nejvyššího nárůstu efektivit chlazení u produktu nejmenšího, 30 ml „Hrošíka“.



Obr. 165 Dosažený nárůst efektivit chlazení při aplikaci CO₂ interního chlazení

9.4 Diskuze vlivu tloušťky stěny produktu na efektivitu CO₂ interního chlazení u extruzně vyfukovacího procesu

V otázce vlivu tloušťky stěny produktu na efektivitu CO₂ interního chlazení samozřejmě platí, že vyšší ochlazovací efekt je evidován u produktů malých tloušťek stěn oproti produktům silnostěnným (přestup tepla rovinou stěnou, kapitola 4). Dále je nutné si uvědomit, že distribuce tloušťky stěny v extruzně vyfukovaných produktech není rovnoměrná (kapitola 3.1.2.) Velké rozdíly v tloušťkách stěn kladou značné nároky na temperačně chladicí systémy a velmi

často způsobují vznik nehomogenního teplotního pole produktu a zapříčiňují vznik teplotních extrémů, které limitují výrobní proces. Rovněž v testovaných experimentálních produkcích (30 ml „Hrošík“, 0,3 l a 0,5 l „lahev“, 7 l „kontejner“) byla evidována místa výskytu teplotních extrémů (obr. 129 až 132). Jednalo se o oblasti dna produktů (důsledek protahování parizonu vlivem gravitačních sil) a oblasti hrdla. Nejvyššími rozdíly v distribuci tloušťek stěn se vyznačoval 7 litrový „kontejner“, kde velikost extrudovaného parizonu společně s dlouhou dobou extruze způsobila jeho značné protažení. Proto dosahovala efektivita injektovaného chladicího média v oblastech dna „kontejneru“ výrazně nižších účinností chlazení (maximální navýšení efektivity chlazení 11 %) než u ostatních testovaných produktů (navýšení efektivity 40 % až 80 %), viz obrázek 128.

9.5 Diskuze vlivu geometrie produktu na efektivitu CO₂ interního chlazení u extruzně vyfukovacího procesu

Vliv geometrie produktu na efektivitu interního chlazení oxidem uhličitým úzce souvisí s výše diskutovanou problematikou rovnoměrnosti distribuce tloušťky stěny produktů. Testované produkty nekuhových průřezů (30 ml „Hrošík“, 0,3 l a 0,5 l „lahvičky“) dosahovaly v oblastech hran („lahvičky“) a tvarově komplikovaných částech (horní končetiny „Hrošíka“) zeslabení tloušťek stěn tvarovaného parizonu. Výsledkem byl vyšší ochlazovací účinek těchto míst. Rozdíly v účincích interního chlazení mezi hranami a středovými oblastmi produktů se stávají ještě zřejmější s rostoucí diferencí mezi průměrem extrudovaného parizonu a geometrií nekuhového výrobku. Pro extruzně vyfukovací proces to znamená, že s rostoucí složitostí geometrie produktu je mnohem více obtížné dosažení rovnoměrné distribuce tloušťky stěny produktu, která následně způsobuje tvorbu teplotních extrémů, a značně tak komplikuje homogenitu teplotního odvodu.

9.6 Diskuze ekonomického zhodnocení aplikovatelnosti CO₂ interního temperačního systému

Vzhledem k vysokým dosahovaným chladicím účinnostem a množství použitého média z provedeného ekonomického rozboru (kapitola 5.5) vyplývá, že finančně rentabilní se jeví pouze výrobní varianta produkce nejmenšího z testovaných produktů (30 ml „Hrošíka“), kde při nejnižší ceně CO₂ (5,9 Kč/ kg) odpovídající odběru minimálně 100 tun za rok, je stanoven denní profit z interního chlazení 293 Kč (jeden extruzně vyfukovací stroj, 24 hodinová produkce) a finanční návratnost systému činí 103 dnů. Náklady spojené s vyšším množstvím použitého chladicího média a nižší dosahovanou efektivitou chlazení u ostatních testovaných produktů (0,3 l a 0,5 l „lahev“, 7 l „kontejner“) zapříčiňují, že výrobní cena jednoho

kusu je u interní chladicí varianty vždy vyšší než u klasického vyfukovacího procesu a výsledná produkce se tedy i přes její nárůst produktivity jeví jako nerentabilní. Přes to, že z finanční kalkulace porovnáním přímých nákladů plyne, že testovaný CO₂ systém společnosti Linde a.s. nepřináší pro produkty středních a velkých objemů přímou finanční úsporu, může právě parametr navýšení produktivity zaručit určitá zvýhodnění (plat zaměstnance, provozní režie, atd.), jelikož stroj lze v daný čas využít k další produkci, viz tab. 37.

Tab. 37 Úspora pracovních dnů spojená s max. dosaženým navýšením produkce

Úspora pracovních dnů - 24h výroba	Za měsíc	Za rok
30ml „Hrošík“ (25% navýšení)	5 dnů	63 dnů
0,3l „lahvička“ (34% navýšení)	7 dnů	84 dnů
0,5l „lahvička“ (43% navýšení)	9 dnů	109 dnů
7l „kontejner“ (21% navýšení)	4 dnů	54 dnů

9.7 Diskuze vlivu CO₂ interního chlazení na vlastnosti produktů

Z vyhodnocených výsledků experimentálního stanovení vlivu CO₂ interního chlazení na užité vlastnosti 0,3 litrové lavičky vyráběné ze zástupců nejpožívanějších polymerních materiálů – polyolefinů (PE Liten BB 29 a PP Mosten EH 01) nelze potvrdit pozitivní ani negativní ovlivnění kvality produktů.

DSC analýza dokazuje prostřednictvím parametru entalpie tání a distribuce endotermních křivek jisté strukturní difference mezi testovanými procesními variantami (1 - bez CO₂, 2 - CO₂ chlazení, 3 - navýšení produktivity díky CO₂ chlazení) u PE produktů, které se u PP produktů vzhledem k jeho výrazně nižším krystalizačně rychlostním schopnostem neprojevily. Aplikace CO₂ interního chlazení způsobila v důsledku vysokého nárůstu efektivity interního chlazení ve spodních lokacích produktů pokles entalpie, a tedy i stupně krystalinity, který byl nejvyšší v oblastech poblíž vnitřní stěny povrchu produktů. Průběhy endotermních křivek vzorků odebraných v těchto oblastech dále predikují tvorbu vyšší orientace makromolekul a zbytkového napětí. Při navýšení produktivity výroby se dají hodnoty entalpie tání i průběhy endotermních křivek považovat za srovnatelné, což dokazuje zrovnoměnění intenzity odvodu tepelné energie na vnějším a vnitřním rozhraním stěny produktu, které by mohlo pozitivně ovlivnit kvalitu výrobků. Vzhledem k pořízeným strukturním snímkům (obr. 151 a 152), kde nejsou pozorovány žádné změny v krystalické struktuře polymerů, vyhodnoceným mechanickým (obr. 161), optickým vlastnostem (tab. 36) a posouzením tvarové stability produktů (obr. 163 a 164), ve kterých rovněž nejsou evidovány významné rozdíly, je možné vyvodit závěr, že výše detekované strukturní difference jsou velice malé a neprojeví se proto ve změně pozorovaných vlastností produktů.

9.8 Diskuze konstrukční optimalizace procesu CO₂ interního chlazení

Z prezentovaných výsledků posouzení aplikovatelnosti CO₂ interního chlazení (kapitola 5) je zřejmé, že ve vyfukovacím procesu existují procesní i konstrukční omezení, která zamezují dosažení ještě více produkčně i ekonomicky zajímavých výsledků. Dalším cílem práce bylo proto odstranění těchto limit.

Jedním z pozorovaných omezujících výrobních faktorů byla nehomogenita teplotní distribuce produktů (obrázek 129 až 132), výskyt teplotních extrémů, které prodlužují nezbytný čas chlazení. Navržený způsob optimalizace této problematiky je představen v kapitole 6.1. Jedná se o nové konstrukční řešení vyfukovacího trnu (obr. 134), jež díky variovatelnému umístění kapilár umožňuje aplikaci interního chladicího média do všech teplotně problematických oblastí produktu. Představené konstrukční řešení dále pomocí fixace kapilár zabraňuje jejich vychýlení (nerovnoměrnému chlazení) a díky porézní struktuře (obr. 135), která při odvodu expandujícího CO₂ zachycuje atomizované krystalky, ještě více navyšuje efektivitu interního chlazení v oblasti hrdla produktu. Kalibrační trn je složen ze dvou vzájemně demontovatelných funkčních částí. Funkční částí, která zajišťuje přívod a odvod vyfukovacího i chladicího média a druhé funkční části trnu, která slouží k vytvarování a kalibraci hrdla produktu. Demontovatelnost obou částí trnů umožňuje využití první funkční části trnu (jádra trnu) pro více typů produktů.

Další omezení spočívá v nastavení a kontrole chladicího procesu. Současné temperační systémy umožňují pouze nastavení procesu chlazení z hlediska časového, tj. start cyklu a velikost dávky. Zařízení tedy slouží čistě k iniciaci a dopravě média do chlazeného nástroje, což uživateli nepřináší žádné informace o probíhajících dějích tepelné výměny a tedy o efektivitě chlazení aktuálního nastavení. Temperační jednotky navíc slouží pouze k přívodu jednoho média. Nově realizovaná temperační jednotka (kap. 6.2) odstraňuje uvedené nedostatky. Pomocí progresivního řízení, které umožňuje vzájemnou kombinaci více chladicích médií a monitorizaci procesních parametrů chlazení, jež přináší uživateli okamžitý přehled o probíhajících teplotně tlakových dějích, je pak možné dosáhnout zvýšení efektivity chlazení a tím zvýšení výrobního taktu při současném snížení provozních nákladů.

V současnosti nejsou k dispozici temperační jednotky zajišťující interní chlazení injektáží zkapalněných plynů (CO₂, N), které je možno snadno integrovat do vyfukovacích strojů zpracovávajících polymerní materiály. Existují pouze externí samostatně řízená zařízení při jejichž využití je třeba počítat s nutností dodatečné instalace komponent, tvorby komunikačního rozhraní, komunikace a řízení technologie externího a interního chlazení pomocí dvou nezávislých ovládacích systémů, a také se zvýšenými nároky na prostorové uspořádání. Proto byla výše

představená inovovaná temperační jednotka integrována do běžného extruzně vyfukovacího stroje (kapitola 6.3). Výsledkem integrace je vznik komplexního zařízení umožňujícího navýšení účinnosti interního chladicího okruhu vyfukovacího procesu pomocí kombinace běžně používaného chladicího média (vzduchu) s progresivnějšími chladicími médii. Samozřejmostí je monitorizace probíhajících tepelně tlakových dějů. Systém byl primárně vyvinut pro technologii extruzního vyfukování, ale je možné jej efektivně aplikovat také pro varianty vyfukovacího procesu jako je vstřikovací vyfukování nebo vyfukování s dlužením.

10 PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavní přínosy disertační práce spočívají v provedení podrobného rozboru problematiky chlazení u vyfukovacího procesu, posouzení aplikovatelnosti CO₂ temperačních systémů pro extruzně vyfukovací proces a zjištění vlivu progresivního interního chlazení na kvalitu výrobků. Z provedené rešerše vyplývá, že existuje jen několik studií zabývajících se problematikou CO₂ interního chlazení, ze kterých navíc není jednoznačně možné vyvodit obecné závěry o aplikovatelnosti této nekonvenční chladicí metody. Proto předkládaná práce přináší cenné informace v otázce způsobu zefektivnění výrobního procesu. Kromě posouzení aplikovatelnosti současných temperačních systémů byla vzhledem k detekovaným výsledkům práce ve spolupráci s firmou GDK spol. s r.o. provedena optimalizace procesu CO₂ interního chlazení. Výsledkem je vznik komplexního zařízení navyšující účinnost interního chladicího procesu.

Přínosy pro vědu jsou stručně charakterizovány v následujících bodech:

- Důkladný rozbor všech aspektů majících vliv na efektivitu odvodu tepelné energie vyfukovacího procesu;
- Ucelení poznatků o interním chlazení vyfukovacího procesu;
- Ucelení poznatků o problematice chlazení zkapalněnými plyny;
- Rozšíření poznatků o nekonvenčních způsobech chlazení aplikovatelných ve vyfukovacím procesu;
- Matematický popis procesu chlazení při konvenčním způsobu výroby vyfukování a při aplikaci progresivního interního chlazení;
- Stanovení chladících charakteristik injektovaného CO₂;
- Důkladný rozbor vlivu interního chlazení na vlastnosti vyfukovaných produktů;
- Stanovení vlivu CO₂ interního chlazení vyfukovacího procesu na utvářenou strukturu, mechanické, optické vlastnosti a tvarovou stabilitu.

Přínosy pro praxi jsou charakterizovány v následujících bodech:

- Stanovení optimálního způsobu nastavení technologických parametrů procesu injektáže CO₂ pro vyfukovací proces;
- Stanovení účinnosti chlazení CO₂ temperačního systému aplikovaného v extruzně vyfukovacím procesu;
- Stanovení aplikovatelnosti CO₂ temperačních systémů společnosti Linde a.s. pro extruzně vyfukovací proces;
- Stanovení vlivu CO₂ interního chlazení na kvalitu vyfukovaných produktů;
- Návrh a realizace inovovaného konstrukčního řešení vyfukovacího trnu vhodného pro aplikaci interního chlazení injektáží zkapalněných plynů;
- Návrh a realizace temperační jednotky umožňující injektáž zkapalněných plynů;
- Návrh a realizace integrace temperační jednotky umožňující injektáž zkapalněných plynů do extruzně vyfukovacího stroje;
- Zvýšení konkurenceschopnosti výrobních společností zavedením inovativního způsobu chlazení.

11 DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM

Součástí předkládané disertační práce je kromě posouzení aplikovatelnosti současných CO₂ temperačních systémů také návrh a realizace inovovaného způsobu interního chlazení zkapalněnými plyny, viz kapitola 6. Další, pro maximální využitelnost chladicího potenciálu oxidu uhličitého, zajímavou optimalizací by mohla být tvorba polouzavřeného interního chladicího systému. Systém by pomocí zásobníku zachycoval expandované odváděné hluboce podchlazené plyné chladicí médium, které by následně mohlo být pro zajištění dostatečné hodnoty vyfukovacího tlaku (účinnost externího temperačního systému) míseno s běžným tlakovým vzduchem a použito v prvotní výrobní fázi - fázi tvarování. Následný proces chlazení by již probíhal běžným způsobem. Po odvedení směsi plyného CO₂ s tlakovým vzduchem by bylo ve fázi interního chlazení opět kontinuálně přivedeno a zachycováno expandující CO₂. Výsledkem této optimalizace by tedy bylo stoprocentní využití chladicího potenciálu zkapalněných plynů, kterého v otevřeném systému nemůže být docíleno.

Z teoretického i ekonomického rozboru je zřejmé, že chladicí potenciál dalšího z používaných zkapalněných plynů, dusíku, v sobě skrývá ještě vyšší chladicí potenciál než oxid uhličitý při srovnatelných nákladech. S aplikací dusíku jsou však spojená určitá procesní i zdravotní rizika. Proto je dalším doporučením věnovat náležitou pozornost podrobnému prozkoumání aplikovatelnosti tohoto nekonvenčního chladicího média pro produkci vyfukovaných polymerních produktů.

Z dosažených výsledků posouzení vlivu CO₂ interního chlazení na kvalitu vyfukovaných produktů je možné konstatovat, že aplikace progresivního interního chlazení injektáží zkapalněného CO₂ nezpůsobí negativní ovlivnění kvality, tzn. mechanických, optických vlastností i tvarové stability malých a středních produktů vyrobených z nejpoužívanějších polymerních materiálů - polyolefinů (PP, PE). Je však otázkou, jak budou ovlivněny vlastnosti produktů vyráběných z materiálů s vyšší citlivostí na termokinetické podmínky tuhnutí, jako je například PET, materiálů s vyššími krystalizačními schopnostmi, či velkoobjemové, silnostěnné produkty. Další doporučení je tedy zaměřit vědecko-výzkumnou činnost na prozkoumání těchto otázek.

Součástí práce je rovněž matematický rozbor a simulační analýza chlazení technologie vyfukování při aplikaci injektáže zkapalněného oxidu uhličitého. Z provedeného rozboru je zřejmé, že hodnoty součinitele přestupu tepla pro systémy využívající chladicího potenciálu oxidu uhličitého (vícefázová směs) nejsou ze současných publikovaných prací známy. Jedná se totiž o velmi obtížně stanovitelnou veličinu závislou na mnoha faktorech (iniciační teplotě, materiálu a tvaru produktu, procesním nastavení injektáže média, efektivitě přestupu tepla, poměru plynné a pevné fáze směsi CO₂, atd.). Dále bylo zjištěno, že současné dostupné simulační softwary neumožňují aplikaci kombinace vícefázových směsí - pevná a plynná fáze CO₂. Vzhledem k složitosti problematiky a rozsahu předkládané disertační práce není její součástí experimentální stanovení hodnot součinitele přestupu tepla. Další vědecko-výzkumná aktivita by proto mohla být směřována k zjištění tohoto parametru, který by po implementaci do simulačních analýz usnadnil a zpřesnil posuzování aplikovatelností CO₂ interních systémů nejen v oblasti zpracování polymerních materiálů.

12 ZÁVĚR

Fáze chlazení je v produkci polymerních produktů jednou z nejdůležitějších částí výrobního procesu, která do značné míry předurčuje produktivitu výroby i kvalitu produktů. S přihlédnutím k těmto skutečnostem byl prvním cílem předkládané práce důkladný rozboru všech faktorů majících vliv na efektivitu tepelné výměny vyfukovacího procesu. Z provedeného rozboru vyplývá, že jednou z velmi progresivních možností jak zefektivnit stávající chladicí proces je aplikace interního chlazení. Zejména využití chladicího potenciálu zkapalněných plynů se jeví jako vysoce efektivní varianta vhodná obzvláště pro velkosériové produkce silnostěnných produktů velkých objemů. Experimentální činnost práce byla proto cílena tímto směrem.

Z výsledků experimentálního posouzení aplikovatelnosti současných temperačních systémů vstřikujících zkapalněný oxid uhličitý (zařízení společnosti Linde a.s.), které bylo provedeno na tvarově i objemově rozdílných produktech, je možné vyvodit obecné závěry. Pro vyfukovací proces je z hlediska efektivity externího i interního temperačního systému nejvýhodnější způsob dávkování kontinuální injektáží. Vzhledem k charakteru proudění je v produktech dosahováno nejvyšší chladicí účinnosti expandujícího oxidu uhličitého ve spodních oblastech. Produkty menších objemů dosahují vyšší teplotní redukce, vyšších efektivit interního chlazení. Proto se tato technologie jeví jako finančně rentabilní, zejména pro produkty malých rozměrů. Přestože u ostatních produktů nepřináší CO₂ interní chlazení přímou finanční úsporu, může být i výrazné navýšení produktivity důležitým parametrem při rozhodování o aplikovatelnosti testovaného chladicího systému.

Dále je vhodné poznamenat, že cena zkapalněného oxidu uhličitého je výrazně závislá na odebraném (spotřebovaném) ročním množství, což potvrzuje teoretický předpoklad o aplikovatelnosti CO₂ temperačního systému zejména pro velké produkční série. S druhým uvedeným teoretickým předpokladem, vhodností systému zejména pro silnostěnné velkoobjemové produkty, nelze vzhledem k experimentálně detekovaným zjištěním souhlasit.

V objektivním hodnocení aplikovatelnosti CO₂ temperačních systémů pro vyfukovací proces nesmí být opomenuto hledisko kvality produktů. Otázkou bylo, zda vysoká intenzita odvodu tepelné energie interního prostředí ovlivní užité vlastnosti vyfukovaných produktů. Dle teoretických předpokladů by aplikace interních temperačních systémů mohla zajistit díky zrovnoměnění termokinetických podmínek obou stran chladnoucího polymerního produktu pozitivní ovlivnění kvality produktů. Tento předpoklad však vzhledem k dosaženým výsledkům není možné

potvrdit ani vyvrátit. Z dosažených výsledků je nicméně možné vyvodit závěry, že aplikace progresivního interního chlazení injektáží zkapalněného CO₂ nezpůsobí negativní ovlivnění kvality, tzn. mechanických, optických vlastností i tvarové stability, malých a středních produktů vyrobených z nejpoužívanějších polymerních materiálů - polyolefinů (PP, PE).

Jelikož byla během aplikace CO₂ interního chlazení zaznamenána procesní i konstrukční omezení, která zamezují dosažení produkčně i ekonomicky zajímavějších výsledků, další cíle práce vedly k odstranění těchto limit.

Procesní limity, kontrola a nastavení chladicího procesu byly eliminovány nově realizovanou temperační jednotkou. Inovovaná temperační jednotka umožňuje vzájemnou kombinaci více chladících médií, monitorizaci zpětné vazby od probíhajících dějů tepelné výměny, což usnadňuje dosažení žádaného zvýšení efektivity a tím zvýšení výrobního taktu při současném snížení provozních nákladů. Temperační jednotka byla následně integrována do extruzního vyfukovacího stroje s cílem vytvoření komplexního výrobního zařízení, jež díky inovovanému způsobu řízení progresivně zvyšuje účinnost interního chladicího procesu.

Konstrukční limity kalibračního trnu (způsob přívodu a fixace kapilár) byly opět odstraněny inovovaným řešením. Nově vzniklý kalibrační trn vyfukovacího procesu speciálně uzpůsobený aplikaci internímu chlazení pomocí zkapalněných plynů zajišťuje díky volitelnému pozicování, ustavení, fixaci kapilár a porézní struktuře jádra trnu zvýšení efektivity odvodu tepelné energie ve všech problematických místech produktů. Kalibrační trn se sestává ze dvou vzájemně demontovatelných funkčních částí. Funkční části, která zajišťuje přívod a odvod vyfukovacího i chladicího média, tvarovací a kalibrační funkční části. Je tedy možné využít první univerzální funkční části trnu pro více výrobních variant produktů.

Výstupy optimalizačních procesů jsou:

- **Prototyp - KSP-2013-G/P-01**- TEMPERAČNÍ JEDNOTKY VSTŘIKUJÍCÍ INERTNÍ PLYNY
- **Užitný vzor - PUV 2013-28947** - KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ OVLÁDACÍHO ROZHRANÍ
- **Zahájení patentového řízení - PV 2013-1011** - ŘÍZENÍ TEMPERAČNÍ JEDNOTKY VSTŘIKUJÍCÍ INERTNÍ PLYNY
- **Prototyp – KSP-2013-G/P-02** - EXTRUZNÍ VYFUKOVACÍ STROJ GM 5000 S INTEGROVANOU JEDNOTKOU VSTŘIKUJÍCÍ INERTNÍ PLYNY

- **Užitný vzor - PUV 2013-28983 - KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA
VYFUKOVACÍHO STROJE**
- **Zahájení patentového řízení - PV 2013-1029 - INTEGROVANÝ SYSTÉM
VSTŘIKOVÁNÍ INERTNÍCH PLYNŮ DO VYFUKOVACÍHO STROJE**
- **Prototyp - KSP-2014-G/P-01 – KALIBRAČNÍ TRN PRO INTERNÍ
CHLAZENÍ VYFUKOVACÍHO PROCESU**
- **Užitný vzor - PUV 2014-30133 – KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA
KALIBRAČNÍHO TRNU**
- **Zahájení patentového řízení - PV 2014-811 - KALIBRAČNÍ TRN
VYFUKOVACÍHO PROCESU VYUŽÍVAJÍCÍ CO₂ INTERNÍ CHLAZENÍ**

13 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ROSAT, D. V, ROSAT, A.V., DiMATHIA, D.P. *Blow Moulding Handbook*. Mnichov, 2004. ISBN 1- 3446-22017-8.
- [2] RYDER L.B. *Fast Mold and Part Cooling Techniques*. Plastic engineering, 1974.
- [3] RYDER L.B. *Faster Cooling for Blow Molding*. Plastic engineering. vol. 31, 1975, ISSN 00919578.
- [4] TAN, S.B, HORNSBY, P.R, McAFEE, M., KEARNS, M.P, McCOURT, M., HANNA, P.R. *An Overview of Internal Cooling in Rotational Moulding*. ANTEC 2008, Milwaukee, USA, vol. 3, ISBN 978-1-60560-320-9.
- [5] STIPSITS, B. *Using -30°C Internal Cooling Air to Achieve Faster Extrusion Blow Molding Machine Cycle via the CAC – Compressed Air Cooling System*. 9th Annual High Performance Blow Molding Conference 1993, New Jersey, USA.
- [6] FASTI. *Internal Cooling for the Blow Molding Industry*, zdroj <http://www.fasti.com/>, získáno 06-2012.
- [7] METALS SERVICE INSTITUTE, ThyssenKrupp Materials NA Copper and Brass Sales Division *Aluminum & Copper Mold Materials*, zdroj <http://www.copperandbrass.com>, získáno 06-2012.
- [8] NORMAN, C. L. *Understanding Blow Molding*. Hanser 2007, ISBN 1569904162.
- [9] AMPCOLOY®, <http://www.ampcometal.com>, 08-2012.
- [10] MOLDMAX®, <http://www.moldmax.com>, 08-2012.
- [11] ZÖLLNER, O. *Optimised Mould Temperature Control*, Application Technology Information, ATI 1104, 1997.
- [12] DULEBA, B. GREŠKOVIČ, F. *Conformal Cooling for Plastics Injection Moulding*. It-strojar. sk 2013, ISSN 1338-0761.
- [13] INNOMIA a.s., [http:// www.innomia.cz/](http://www.innomia.cz/), 11-2012.
- [14] SHELLABEAR, M. , WEILHAMMER, J. *Applications with Eosint M*, EOS GmbH Electro Optical Systems, zdroj <http://www.eos.info/en>, získáno 04-2012.
- [15] PETERSON, B. H. *Feasibility of Ceramic Castings for Conformal Cooling Blow Molds*, Chemical and Materials Department Arizona State University, USA, 2010.

- [16] SAIFULLAH, A. B. M., MASOOD, S.H., SBARSKI, I. *New Cooling Channel Design for Injection Moulding*. Proceedings of the World Congress on Engineering 2009, U.K., 2009, ISBN: 978-988-17012-5-1.
- [17] LYNDELL CHEMICAL COMPANY, *Faster Cooling – the Answer is in the Wind*, zdroj <http://www.Lyondell.com>, získáno 04-2012.
- [18] GUNTHER, Sch., WALTER, M. *High Pressure Blow Molding, an Innovative Way for Decreasing Cooling Time*. ANTEC 1998, USA, Conference Proceedings. vol. 1, 1998, ISBN 978-1-56676-669-2.
- [19] EDWARDS, M. F., GEORGHIADES, S., SUVANAPHEN, P.K. *A Study of the Cooling of Blow Moulded Objects. Plastic and Rubber Processing and Applications*, vol. 1, no. 2, 1981, ISSN 0307-9414.
- [20] ACCUFORM, <http://www.t-sim.com/>, 10-2012.
- [21] KALYON D. M., KAMAL, M.R. *Heat Transfer and Microstructure in Extrusion Blomolding*. Journal of Polymer Engineering and Science. vol . 23, no. 9, 1983, ISSN 1548-2634.
- [22] KALYON, D. M., JEONG S. Yu. *Microstructure Development in Blow Molded Amorphous Engineering Plastic*. Journal of Plastic, Rubber and Composites Processing and Applications. vol .15, no. 2, 1991, ISSN 0959-8111.
- [23] JORG, Ch. *Carboxyl Dioxide Cooling Method May Take the Waiting Out of Plastic Parts*. Journal of Automotive Engineering, 2006, ISSN 2008-9899.
- [24] MAES, P., NEIL, A. M., MEYER, E. W. *Apparatus for Forming the Neck Finish of Blow Molded Container*, 1986, patent US 4,753,591.
- [25] RYDER, L.B. *Method for Injection Blow Molding*. 1973, patent US 4,244,913.
- [26] PETERS, D. L., WILSON, R. W. *Apparatus for Cooling the Blow Pin and Plastic Molding Material During Blow Molding Operation*, 1973. US 3,717,429.
- [27] OVIDIU P, BORGES, E. C. *Blow Molding Needle*, 2006, patent US 0290033 A1.
- [28] BURNS, E. B., TAYLOR L. M. *Blow Needle for Extrusion Blow Molding PET*, 2013. patent US 8,523,557 B2.
- [29] YUZO, O., SYOUJI, S., TAKATOSHI, W., AKIRA, R., HAJIME, K., YOSHITALKA, O., TOSHIO, K. SHOEI, M., SHOJI, A. *Needle Blow Nozzle and Blow Molding Apparatus*, 2003, patent US 6,537,056 B1.
- [30] MATSUHAHI, S., KAISHA, T. S., *Method for Blow Molding Hollow Articles*, 1996, patent US 5,565,165.

- [31] CULPEPER, E., *Method for Cooling Blow Molded Articles*, 1970, patent US 3,505,442.
- [32] BEKOBLIZZ®, <http://www.beko.de/BEKOBLIZZ.23.0.html>, 02-2012.
- [33] FASTI – A Farag Company, <http://www.fasti.com/product3.php>, 03-2012.
- [34] KARÁSEK, P. *Monitorizace chlazení u technologie vyfukování*. Liberec, TU v Liberci, 2007, Diplomová práce.
- [35] POUPA, T. *Teplotní analýza vstřikovací formy při nekonvenčním způsobu temperování ranque-hilsch vírovou trubicí*, Liberec, TU v Liberci, 2005, Diplomová práce.
- [36] TAN, S.B, HORNSBY, P.R, McAFEE, M., KEARNS, M.P, McCOURT, M., *Water Spray Cooling of Polymers*. Journal of Polymer Engineering and Science, 2012, DOI 10.1002/pen.
- [37] MICHAELI, W., BRUMER, T. *Reduction o Cooling Time by Using Atomized Watter in Blow Molding*. ANTEC 2007, Ohio, USA, Conference Proceedings. vol. 4, 2007, ISBN 978-1-60423-24-1.
- [38] HUNKAR, D.B. *Cooling Blow – Molded Bottles From the Inside Out*, Journal of Plastic Engineering, vol. 29, 1973, ISSN 0091-9578.
- [39] ČESKÁ ASOCIACE TECHNICKÝCH PLYNŮ (ČATP). *Oxid uhličitý v průmyslu a životním prostředí*, zdroj <http://www.catp.cz/publikace2.php>, získáno 02-2013.
- [40] UNION ENGINEERING, *Properties of Carbon Dioxide*, zdroj <http://www.union.dk>, získáno 05-2013
- [41] ČESKÁ ASOCIACE TECHNICKÝCH PLYNŮ (ČATP). *Oxid uhličitý*, zdroj <http://www.catp.cz/publikace2.php>, získáno 04-2013.
- [42] AVERY, J. *Gas-assist Injection Molding: a Principles and Applications*. Cincinnati, OH: Hanser Gardner Pub., 2001, p 3-29. ISBN 9781569902981.
- [43] BOSE, R. N., *Faster Mold cooling using CO2*, Tech Pap, Chicago, USA 1974
- [44] LINDE. *Production of Plastic Material*, zdroj <http://www.linde-gas.cz/cs/industries/plastics/index.html>, získáno 05-2012
- [45] AIR PRODUCT, <http://www.airproducts.cz/>, 03-2012
- [46] RESGREN, PRALLER U., PRALLER A. *Industrial Gases in Plastics Processing. Kunststoffe*, vol. 9, 2004, zdroj <https://www.kunststoffe.de/>, získáno 01-2013.
- [47] MGLEE, C. *Comparison Carbon Dioxide Water Phase Diagrams*, zdroj http://en.wikipedia.org/wiki/File:Comparison_carbon_dioxide_water_phase_diagrams.svg, získáno 03-2013.
- [48] ČESKÁ ASOCIACE TECHNICKÝCH PLYNŮ (ČATP). *Dusík*, zdroj <http://www.catp.cz/publikace2.php>, získáno 01-2013.
- [49] GIBBS, M.L., *Liquid Nitrogen Cooling for Blow Molded Parts: Effects on Cycle Time and Bottle Performance*, Annual Technical Conference - Society of Plastics Engineers, ANTEC 1989, New York, NY, USA, ISSN 07334192.

- [50] CONNOR III, D.E, *Internal Cooling of Plastic Fuel Tanks with Direct Injection of Liquid Nitrogen*, 49th Annual Technical Conference - ANTEC '91; Montreal, Que, Kanada 1991.
- [51] CORBETT, M.A. *Technology and Process Requirements for Repeatable Blow Molded Internal Part Cooling with Liquid Nitrogen*, Proceedings of the 9th Annual High Performance Blow Molding Conference, 1993.
- [52] FRANZ, P. *Termoregulace nástrojů pro tlakové lití a tenkých jader, cesta k provozním úsporám*, zdroj www.lethiguel.com, získáno 01-2013.
- [53] MIEHLS, B. A. , SILVIUS, B. A. *Method of Manufacturing a Liquid Cooled Blow Molded Article*, 2002, patent US 6,358,462.
- [54] LOVREC, D., TIČ, V. *Energy Saving Cooling-unit Plastic Moulding machine*. Strojní věstník - Journal of Mechanical Engineering, Slovenia, 2011, ISSN: 0039-2480.
- [55] MEISSNER, B.; ZILVAR, V. *Fyzika polymerů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. ISBN 04-634-87

14 PUBLIKAČNÍ ČINNOST K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE

- [1] BRDLÍK, P. *Unconventional Cooling Method of Blow Moulding Process*. In: Sborník Mezinárodní Baťovi konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín, ČR, 04-2011. ISBN 978-80-7454-013-4.
- [2] BRDLÍK, P. *The Influence of Cooling Blow Moulding Process on Mechanical Behavior*. Journal of Interdisciplinary Research, AD ALTA, vol. 1, Hradec Králové, ČR, 06-2011, ISSN 1804-7890.
- [3] BRDLÍK, P. *The Batching Injection of CO₂ in Blow Molding Process*. In: Sborník 10th International Conference Modern Technologies in Manufacturing, University of Cluj-Napoca, Technical University of Cluj-Napoca, Romania, 10-2011, ISBN 978-606-8372-02-0.
- [4] BRDLÍK, P. *The Optimal Manner of Cooling Common Temperature Reduction System of Blow Mould*. In: Sborník Masarykovi konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, Hradec Králové, ČR, 11-2011, ISBN 978-80-904877-7-2.
- [5] BRDLÍK, P. *The Efficiency of Cooling System Injection of Liquid CO₂ for Small Blowing Products*. In: Sborník Interdisciplinární mezinárodní vědecká konference doktorandů QUARE 2012, Hradec Králové, ČR, 05-2012, ISBN 978-80-905243-0-9.
- [6] BRDLÍK, P. *The Increases of Blow Molding Thermal Reduction with Help of CO₂*. In: Sborník Workshopu Světlanka, Liberec, Technická univerzita v Liberci, ČR, 09-2012, ISBN 978-80-7372-891-5
- [7] BRDLÍK, P. *Aplikace CO₂ chlazení pro vyfukovací proces*, In: Sborník 11 mezinárodní konference TechMat 2012, Pardubice, Univerzita Pardubice, Svítavy, ČR, 11-2012, ISBN 978-80-7395-537-3
- [8] BRDLÍK, P., SEIDL, M. *Využitelnost chladícího potenciálu oxidu uhličitého v plastickém průmyslu*, časopis Plasty a kaučuk, vol. 50, Zlín, ČR, 8-2013, ISSN 0322-7340.
- [9] BRDLÍK, P., LENFELD, P. *The Effect of Internal Cooling on Blow Molded Products*. Journal of Interdisciplinary Research, AD ALTA, vol. 3, Hradec Králové, ČR, 06-2013, ISSN 1804 – 7890
- [10] BRDLÍK, P., LENFELD, P., KŮSA, P. *The Efficiency of Internal CO₂ Cooling in Relation to Product Volume and Thickness*, In: Proceedings of International Congress on Engineering and Technology ICET 2013, Dubrovnik, Chorvatsko, 06-2013, ISBN 978-80-87670-08-8
- [11] BRDLÍK, P. *The Influence of Carboxyl Dioxide Cooling on Mechanical Properties of Blow Molded Products*. In: Proceeding of International Scientific and Expert Conference, Prešov, SK, 11-2013, ISSN 4847-9065.
- [12] BRDLÍK, P., LENFELD, P. *Hračka tvaru hrošíka*. Průmyslový vzor 35582, zapsáno 04-2013.
- [13] BRDLÍK, P., KŮSA, P. *Temperační jednotka vstřikující inertní plyny*. Prototyp KSP/2200/25, zapsáno 12-2013.

- [14] BRDLÍK, P., KŮSA, P. *Konstrukční uspořádání ovládacího rozhraní*. Užitný vzor - PUV 2013-28947, podáno 12-2013.
- [15] BRDLÍK, P., KŮSA, P. *Řízení temperační jednotky vstřikující inertní plyny*. Patent - PV 2013-1011, podáno 12-2013.
- [16] BRDLÍK, P., KŮSA, P. *Extruzní vyfukovací stroj GM 5000 s integrovanou jednotkou vstřikující inertní plyny*. Prototyp KSP/2200/25, zapsáno 12-2013.
- [17] BRDLÍK, P., KŮSA, P. *Konstrukční úprava vyfukovacího stroje*. Užitný vzor - PUV 2013-28983, podáno 12-2013.
- [18] BRDLÍK, P., KŮSA, P. *Integrovaný systém vstřikování inertních plynů do vyfukovacího stroje*. Patent - PV 2013-1029, podáno 12-2013.
- [19] BRDLÍK, P. *Blow Pin Construction Optimization Used for Internal Cooling*. In: Sborník Interdisciplinární mezinárodní vědecká konference doktorandů QUARE 2014, Hradec Králové, ČR, 05-2014, ISBN 978-80-87852-04-2.
- [20] BRDLÍK, P. *Využitelnost chladicího potenciálu oxidu uhličitého ve vyfukovacím procesu*, In: Sborník SVOČ 2014, Liberec. Technická univerzita v Liberci, ČR, 05-2014, ISBN 978-80-7494-071-2
- [21] BRDLÍK, P. *Optimal Approach of Carboxyl Dioxide Internal Blow Molding Cooling Process*, In: Proceeding of SCIECONF 2014, Žilina, SK, 06-2014, ISSN 1339-3561.
- [22] BRDLÍK, P., LENFELD, P. *Dutá nádobka ve tvaru prasátka*. Průmyslový vzor 2577528, podáno 10-2014.
- [23] BRDLÍK, P., KŮSA, P. *Kalibrační trn pro interní chlazení vyfukovacího procesu*. Prototyp KSP-2014-G/P-01 zapsáno 10-2014.
- [24] BRDLÍK, P., KŮSA, P. *Konstrukční úprava kalibračního trnu*. Užitný vzor - PUV 2014-30133, podáno 10-2013.
- [25] BRDLÍK, P., KŮSA, P. *Kalibrační trn vyfukovacího procesu využívající CO₂ interní chlazení*. Patent - PV 2014-811, podáno 10-2013.

15 SEZNAM PŘÍLOH A PŘÍLOHY

Seznam příloh:

- Příloha 1 – Realizace návrhu 30 ml produktu „Hrošíka“ použitého za účelem testování aplikovatelnosti CO₂ interního chlazení u tvarově komplikovaných produktů
- Příloha 2 – Výkresová dokumentace vyfukovací formy 30 ml produktu „Hrošíka“
- Příloha 3 – Výkresová dokumentace vyfukovací formy 0,3 litrové nádoby
- Příloha 4 – Konstrukční řešení stávajících kalibračních trnů
- Příloha 5 – Inovativní konstrukční řešení kalibračních trnů
- Příloha 6 – Inovativní tepemperační jednotka umožňující injektáž zkapalněných plynů a zároveň monitorizaci zpětné vazby
- Příloha 7 – Vizualizace nastavení procesu injektáže v rozhraní inovované temperační jednotky
- Příloha 8 – Vizualizace výsledků zpětné vazby v rozhraní inovované temperační jednotky
- Příloha 9 – Porovnání endotermních křivek PP vzorků odebraných ve stěně a dnu produktu
- Příloha 10 – Porovnání endotermních křivek PP vzorků odebraných v oblasti vnější a vnitřní tloušťky produktu

Příloha 1 – Realizace návrhu 30 ml produktu „Hrošíka“ použitého za účelem testování aplikovatelnosti CO₂ interního chlazení u tvarově komplikovaných produktů



Technical drawing of a mechanical part, showing a top view and a side view. The top view is a rectangular plate with a central irregular shape and four circular holes. The side view shows the thickness of the plate and the positions of the holes. Dimensions are given in mm.

Top View Dimensions:

- Overall width: 130,0
- Overall height: 140,0
- Central shape width: 96,0
- Central shape height: 48,0
- Distance from top edge to top holes: 20,0
- Distance from bottom edge to bottom holes: 40,0
- Distance from left edge to left holes: 40,0
- Distance from right edge to right holes: 40,0
- Distance from top edge to top hole center: 85,0
- Distance from bottom edge to bottom hole center: 11,0
- Distance from left edge to left hole center: 9,00
- Distance from right edge to right hole center: 11,0
- Distance from top edge to top hole center: 150,0
- Distance from bottom edge to bottom hole center: 96,0
- Distance from left edge to left hole center: 18,0
- Distance from right edge to right hole center: 73,0
- Distance from top edge to top hole center: 0,00
- Distance from bottom edge to bottom hole center: 0,00
- Distance from left edge to left hole center: 0,00
- Distance from right edge to right hole center: 0,00

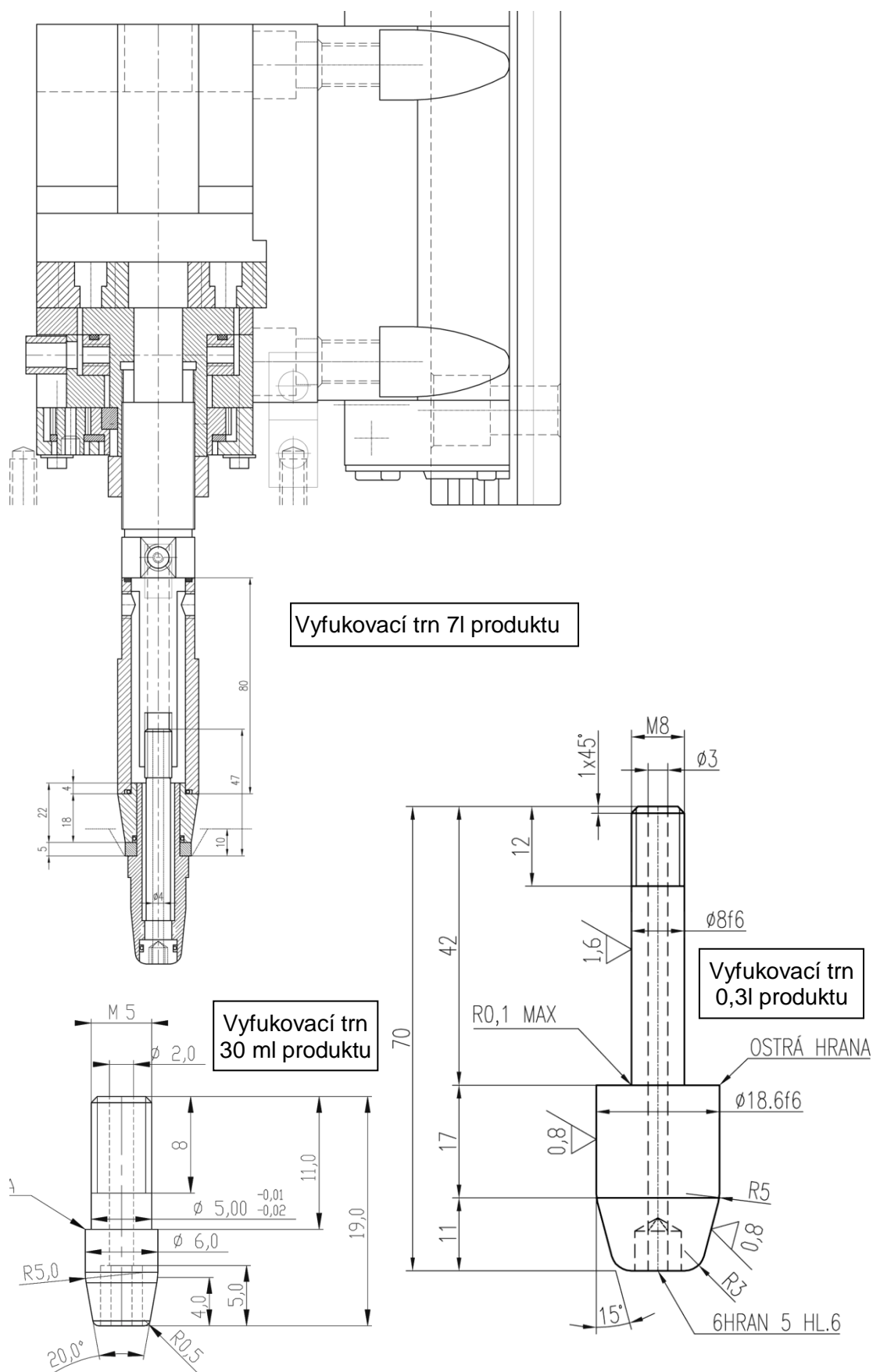
Side View Dimensions:

- Overall height: 95,0
- Distance from top edge to top hole center: 17
- Distance from bottom edge to bottom hole center: 17
- Distance from left edge to left hole center: 36,0
- Distance from right edge to right hole center: 36,0

Notes:

- KRATKY KOLIK
- ODLEHCENI DELICI ROVINY 0,04mm - POUZE NA S.P.

Příloha 4 – Konstrukční řešení stávajících kalibračních trnů



Příloha 5 – Inovativní konstrukční řešení kalibračních trnů

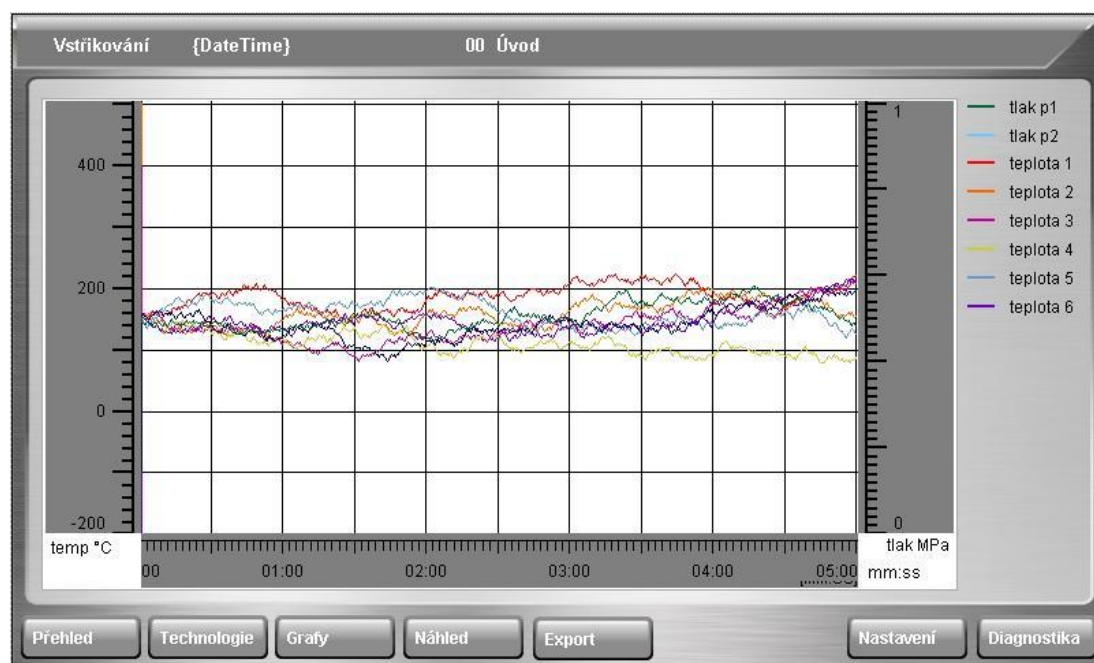


Příloha 6 – Inovativní tepemperační jednotka umožňující injektáž zkapalněných plynů a zároveň monitorizaci zpětné vazby

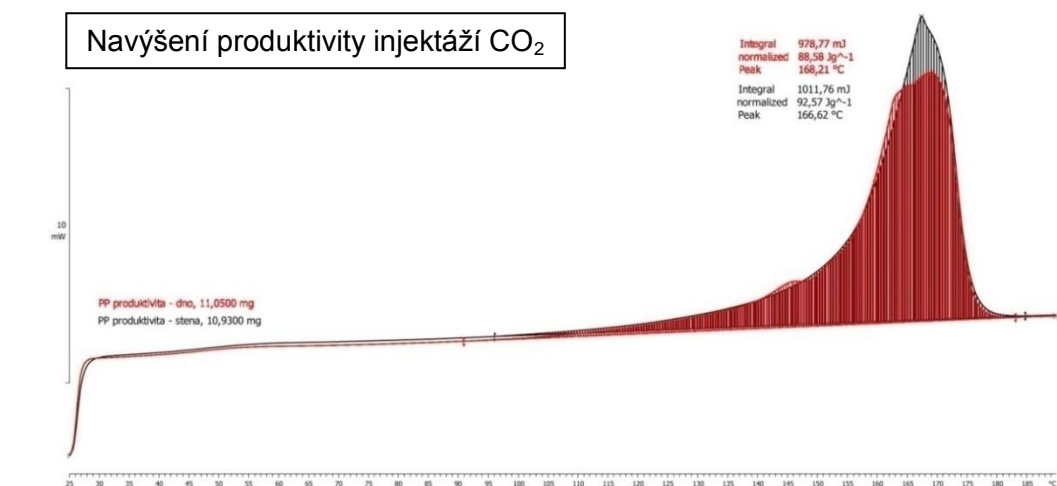
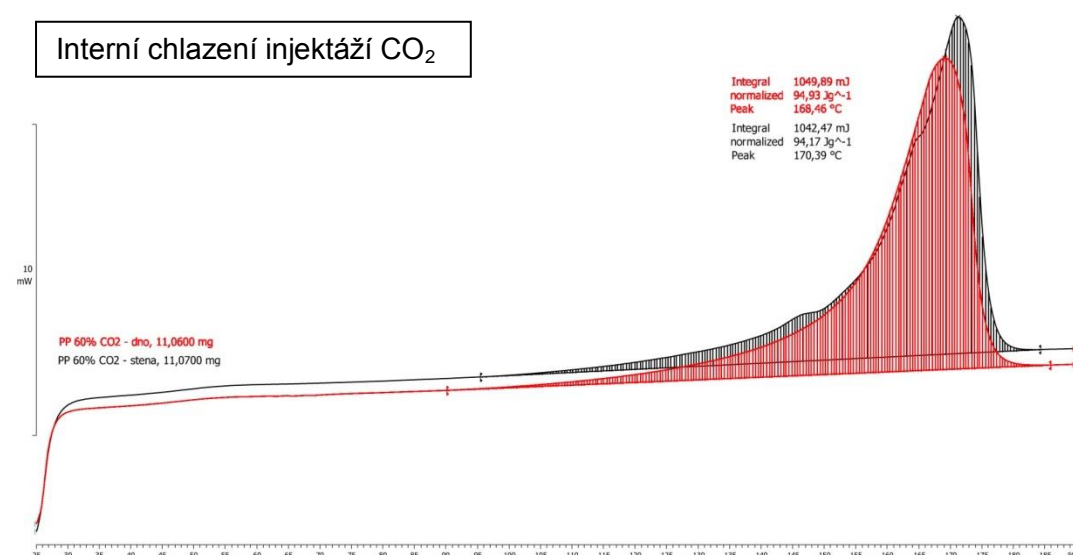
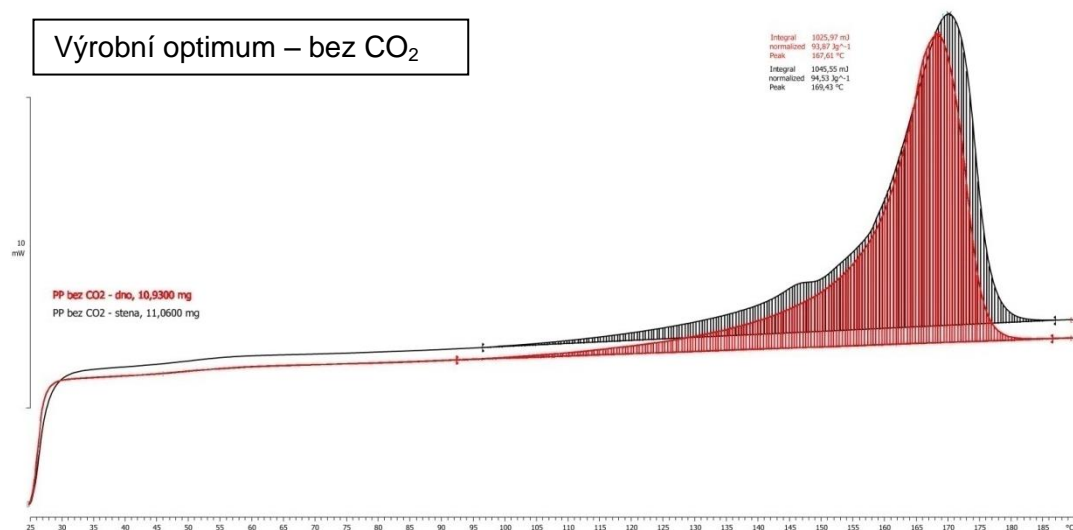


Příloha 7 – Vizualizace nastavení procesu injektáže v rozhraní inovované temperační jednotky

Příloha 8 – Vizualizace výsledků zpětné vazby v rozhraní inovované temperační jednotky

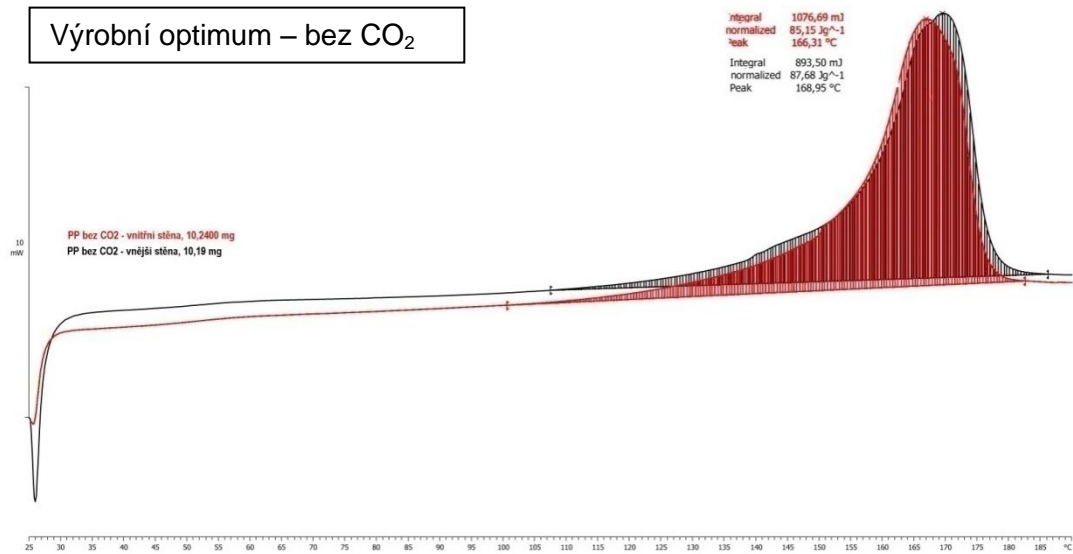


Příloha 9 – Porovnání endotermních křivek PP vzorků odebraných ve stěně a dnu produktu

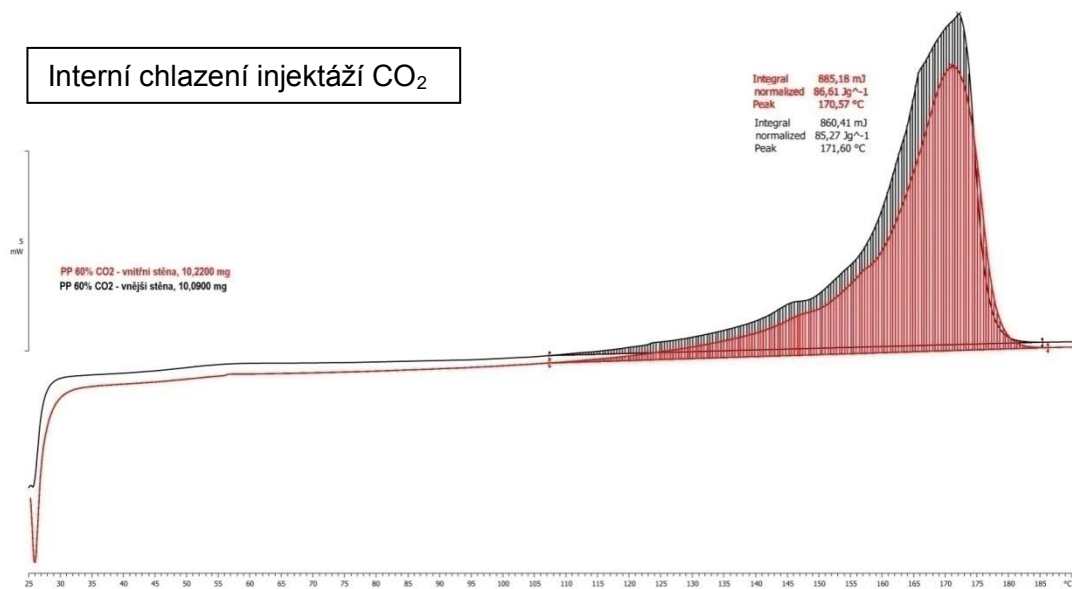


Příloha 10 – Porovnání endotermních křivek PP vzorků odebraných v oblasti vnější a vnitřní tloušťky stěny produktu

Výrobní optimum – bez CO₂



Interní chlazení injektáží CO₂



Navýšení produktivity injektáží CO₂

